

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

REKONSTRUKCE TVARU POLYGONÁLNÍCH MODELŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ KLÍMA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

REKONSTRUKCE TVARU POLYGONÁLNÍCH MODELŮ

POLYGON MESHES RECONSTRUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ KLÍMA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŠPANĚL, Ph.D.

BRNO 2013

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou statistického zpracování polygonálních modelů. Cílem diplomové práce je rekonstrukce polygonálního modelu poškozené lebky. Rekonstrukce je řešena pomocí statistického modelu tvaru lebky. Práce pokrývá problém registrace lebek založené na metodě thin-plate spline, zarovnání modelů obecnou prokrústovskou analýzou, identifikaci chybějících částí lebky jako odlehlých hodnot statistického modelu. Následně práce řeší doplnění chybějících částí lebky a ověření věrohodnosti doplněných částí.

Abstract

This thesis is focussed on the reconstruction of a damaged skull represented by a polygonal model. The reconstruction is based on a statistical shape model of the skull. The thesis covers the registration of skulls by using a thin-plate spline method, aligning polygonal models by generalized procrustes analysis, the identification of missing parts of a skull by means of statistical shape models outliers analysis. Finally, missing parts of the skull are reconstructed and the accuracy of the reconstruction is estimated.

Klíčová slova

modelování implantátů, statistické modely tvaru, geometrická morfometrie, identifikace odlehlých hodnot

Keywords

prosthesis modelling, statistical shape models, geometric orometry, outlier identification

Citace

Ondřej Klíma: Rekonstrukce tvaru polygonálních modelů, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013

Rekonstrukce tvaru polygonálních modelů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Michala Španěla, Ph.D. Další informace poskytla RNDr. Petra Urbanová, Ph.D. z Ústavu antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity.

.....

Ondřej Klíma
14. května 2013

Poděkování

Děkuji vedoucímu své diplomové práce, Ing. Michalu Španělovi, Ph.D., za odbornou pomoc při tvorbě této práce a společnosti 3Dim Laboratory s.r.o. za konzultace a poskytnutí datové sady pro experimenty. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Petře Urbanové, Ph.D. za poskytnuté rady a taktéž za data poskytnutá k experimentům.

© Ondřej Klíma, 2013.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1 Úvod	3
2 Rekonstrukce kostí pomocí statistických modelů	4
2.1 Resektované pánve	4
2.2 Rekonstrukce lebky	4
2.3 Mandibulární displasie	5
3 Statistické modelování tvarů	6
3.1 Základní pojmy statistické analýzy tvaru	6
3.2 Porovnání tvarů	10
3.3 Vytvoření statistického modelu a rekonstrukce objektů	13
3.4 Identifikace odlehlých hodnot	15
4 Anatomie lebky	19
4.1 Kranio-metrické body	19
4.2 Vybrané anatomické roviny a směry	19
4.3 Části lebky	20
5 Návrh řešení	22
5.1 Fáze a kroky navrhované metody	22
5.2 Anotace sadou landmarků a zarovnání modelů	25
5.3 Oříznutí lebek v trénovací sadě	26
5.4 Zrcadlení trénovací sady	28
5.5 Projekce pseudolandmarků	28
5.6 Odstranění chybně projektovaných pseudolandmarků	29
5.7 Rekonstrukce povrchu na základě pseudolandmarků	31
5.8 Registrace referenční lebky na ostatní modely v sadě	32
5.9 Rekonstrukce bodů pomocí PPCA	36
5.10 Korekce velikosti rekonstruovaných modelů	36
5.11 Testování věrohodnosti rekonstrukce	36
6 Realizace	38
6.1 Datové sady	38
6.2 Anotace polygonálních modelů	39
6.3 Implementace	39

7	Výsledky	41
7.1	Identifikace chybně projektovaných pseudolandmarků	41
7.2	Odstranění chybně registrovaných bodů	48
7.3	Rekonstrukce chybějících vrcholů	50
7.4	Vyhlazení hrany zranění	52
7.5	Věrohodnost rekonstrukce	53
7.6	Shrnutí výsledků	56
8	Závěr	57
A	Obsah CD	62

Kapitola 1

Úvod

Tato práce se zaměřuje na oblast modelování kraniálních implantátů. Kraniální implantáty a protézy nahrazují chybějící části lebky, o které pacient přišel v důsledku traumatu či resekce kosti. Trauma lebky může být způsobeno vážným úrazem hlavy, resekce kosti je nutná například v případě, že je kost napadená zhoubným nádorem. V těchto případech je nutné chybějící části lebky nahradit individuálně tvarovanou protézou. Vytváření individuálního implantátu se odehrává v rukou modeláře, pracujícího v CAD/CAM systému s 3D modelem pacientovy lebky, získaného pomocí počítačové tomografie a segmentačních nástrojů. Na základě symetrie lebky, nebo tvarově blízké lebky, je modelářem vytvořena pacientova protéza. Rekonstrukci lebky na základě symetrie ale nelze použít v případech, kdy zranění protíná mediální rovinu lebky. Další problémy vyplývají ze skutečnosti, že symetrické části lidského těla ve skutečnosti nejsou dokonale symetrické. Nepřesnost je problémem i při rekonstrukci na základě modelu podobné lebky.

Cílem této diplomové práce je modelování implantátů usnadnit pomocí semi-automatické rekonstrukce lebek. Modelář tak bude mít k dispozici pravděpodobný tvar lebky před jejím poškozením, který bude poskytovat věrnější předlohu pro implantát, než kterými jsou symetrické části či tvarem blízká lebka. Rekonstrukce lebky bude řešena pomocí statistického modelu tvaru, vytvořeného z trénovací sady několika desítek polygonálních modelů. Při vytváření statistického modelu budou modely registrovány postupem založeným na metodě *thin-plate spline*, bude řešeno sesouhlasení modelů pomocí zobecněné prokrústovské analýzy, identifikace odlehklých hodnot statistického modelu a jejich nahrazení nejpravděpodobnějšími hodnotami. Závěrem bude testována věrohodnost rekonstruovaných částí pomocí Hausdorffovy vzdálenosti mezi kompletní a uměle poškozenou, posléze rekonstruovanou lebkou.

Druhá kapitola obsahuje stručný přehled prací, které se věnovaly rekonstrukci kostí pomocí statistických modelů. Třetí kapitola přibližuje základy statistických modelů tvaru, metody pro porovnání tvarů a polygonálních modelů, způsoby anotace polygonálních modelů sadou landmarků a vytvoření statistického modelu ze sady modelů. Čtvrtá kapitola přibližuje některé základní anatomické pojmy, které se v práci vyskytují. Pátou kapitolou začíná praktická část diplomové práce. Kapitola obsahuje návrh metody pro rekonstrukci tvaru poraněných lebek. Šestá kapitola je věnována záležitostem spojeným s realizací navržené metody, zejména zajištění datových sad, softwarových prostředků a implementaci. Sedmá kapitola se věnuje experimentování s navrženou metodou, odhadu ideálního nastavení metody a zhodnocení dosažených výsledků.

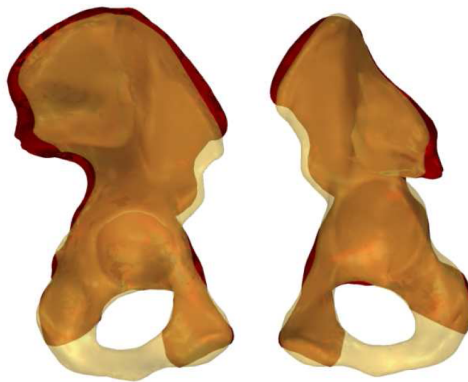
Kapitola 2

Rekonstrukce kostí pomocí statistických modelů

Kapitola uvádí stručný přehled prací, které se věnovaly rekonstrukcím kostí pomocí statistických modelů. Z těchto prací je dále čerpáno a bude na ně odkazováno v dalších kapitolách.

2.1 Resektované pánve

Rekonstrukci pánevních kostí se věnoval P. Skadlubowicz. Skadlubowiczova práce [21] je zaměřena na rekonstrukci pánve po resekcí části napadené nádorem. Statistický model je tvořen z polygonální reprezentace pánevních modelů. Hlavním rysem práce je nutnost manuálního vytváření statistického modelu na konkrétní poškozenou pánev. Ukázka výsledku Skadlubowiczovi práce je na obrázku 2.1.

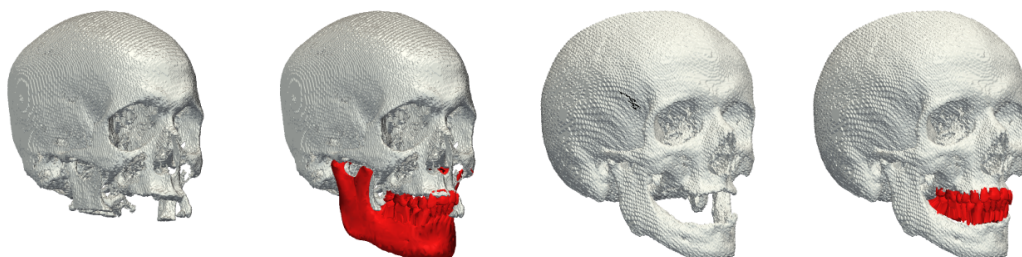


Obrázek 2.1: Pánev rekonstruovaná pomocí statistického modelu. Převzato z [21].

2.2 Rekonstrukce lebky

Thomas Albrecht řeší ve své dizertační práci *3D Statistical Shape Models of Human Bones* [2] statistické modely v širším měřítku, mimo jiné se zde věnuje i rekonstrukci lebky. Na rozdíl od Skadlubowiczovi práce jsou statistické modely vytvářeny z volumetrických dat a rekonstrukce chybějících částí je realizována pomocí identifikací odlehlých hodnot a jejich

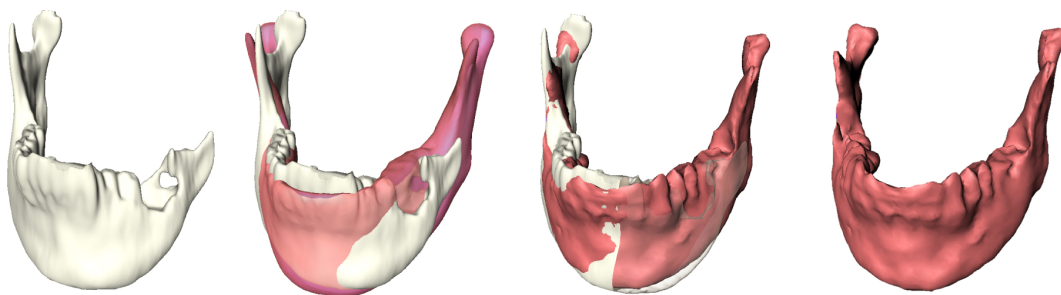
nahrazením nejpravděpodobnějšími hodnotami. Ukázka rekonstrukce lebky Albrechtovou metodou je na obrázku 2.3. Červeně jsou zvýrazněny chybějící a rekonstruované části lebky.



Obrázek 2.2: Rekonstrukce nekompletního modelu lebky. Převzato z [2].

2.3 Mandibulární displasie

Poslední zde zmíněná práce se zabývá rekonstrukcí dolní čelisti postižené mandibulární displasií [23]. Základem bylo vytvoření statistického modelu mandibuly ze zdravých vzorků. Statistický model byl rozdělen na několik částí. Deformovaná spodní čelist je konstruována tak, že na nejméně degenerovanou část je vytvarována odpovídající část statistického modelu, a na základě korelací mezi částmi modelu jsou vytvarovány i zbývající části. Postup je ilustrován na obrázku 2.3. Úplně vlevo je mandibula určená k rekonstrukci. Na druhém ob-



Obrázek 2.3: Rekonstrukce čelisti postižené mandibulární displasií. Převzato z [23].

rázku zleva jsou současně deformovaná a průměrná čelist. Na třetím obrázku je statistický model vytvarovaný podle pravé, nepoškozené části mandibuly zároveň s deformovaným modelem, na posledním rekonstruovaná čelist.

Kapitola 3

Statistické modelování tvarů

Kapitola se zabývá statistickou analýzou tvarů a je rozdělena do tří částí. První část je věnována úvodu a vysvětlení základních pojmů a postupů týkajících se statistické analýzy tvaru. Následující část popisuje metody pro deformování a porovnávání tvarů založených na landmarcích a polygonálních modelech. Třetí část je věnována vytvoření statistického modelu založeného na polygonálních či volumetrických modelech. Poslední část se zabývá shlukovací metodou DBSCAN [14], která umožňuje identifikaci odlehlých hodnot.

3.1 Základní pojmy statistické analýzy tvaru

Sekce obsahuje stručný úvod do statistické analýzy tvaru. Čerpá zejména z článku *A Brief Introduction to Statistical Shape Analysis* [22] od Mikkela B. Stegmanna.

Definice tvaru

Základním stavebním kamenem analýzy je pojem *tvar*. Tvar byl D.G. Kendallem definován následujícím způsobem [13]:

Definice 1 *Tvar jsou veškeré geometrické informace o objektu, které objektu zůstanou po zanedbání jeho velikosti, polohy a natočení.*

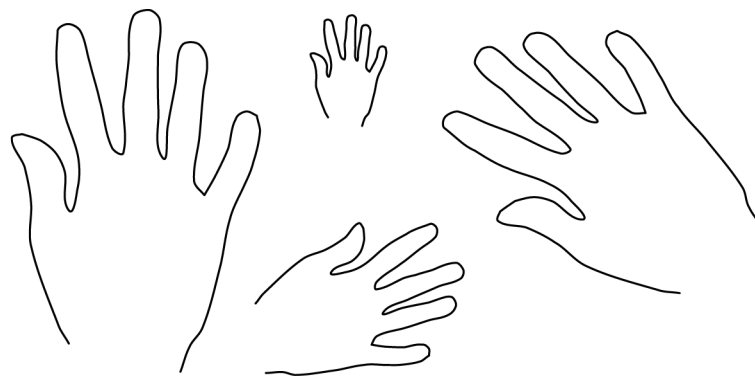
Takto definované tvary jsou invariatní vzhledem k afinním transformacím, jak ukazuje obrázek 3.1. Vyobrazuje čtyři kopie tvaru ruky, jež jsou z pohledu statistické analýzy identické.

Aby bylo možné tvary statisticky analyzovat, je potřeba dále definovat jejich matematický popis. V praxi existuje způsobů popisu více, jeden z nejhojněji používaných je založen na umístění význačných bodů, tzv. *landmarků*. Dalším způsobem je například popis obrysu tvaru pomocí koeficientů Fourierovy transformace.

Pojem landmark má následující definici [13]:

Definice 2 *Landmark je bod korespondující mezi všemi objekty, které se vyskytují ve zkoumaném souboru.*

Existuje klasifikace, která landmarky rozděluje do tří skupin [13], konkrétně na landmarky anatomické, matematické a semi-landmarky. Kvalita schopnosti popisovat tvar klesá směrem v uvedeném pořadí skupin. Na obrázku 3.2 je ukázka popisu tvaru ruky pomocí landmarků.



Obrázek 3.1: Čtyři identické tvary. Převzato z [22].

Prokrústovská analýza

Jak bylo uvedeno v definici výše, tvar musí být zbaven vlivu afinních transformací, což zajišťuje prokrústovská analýza. Tato analýza existuje ve dvou podobách, označovaných jako obyčejná a zobecněná prokrústovská analýza [13].

Obyčejná prokrústovská analýza (OPA)

Pomocí obyčejné varianty se na sebe superponují dva tvary tak, aby vzdálenost mezi korepondujícími landmarky byla minimální. Postup superpozice se odehrává ve třech krocích:

1. přesun landmarků na centroid¹ zajišťuje zanedbání vlivu polohy tvarů,
2. normalizace centroidovou velikostí má za následek odstranění transformace zvětšení,
3. posledním krokem je ideální natočení tvarů vůči sobě.

Zobecněná prokrústovská analýza (GPA)

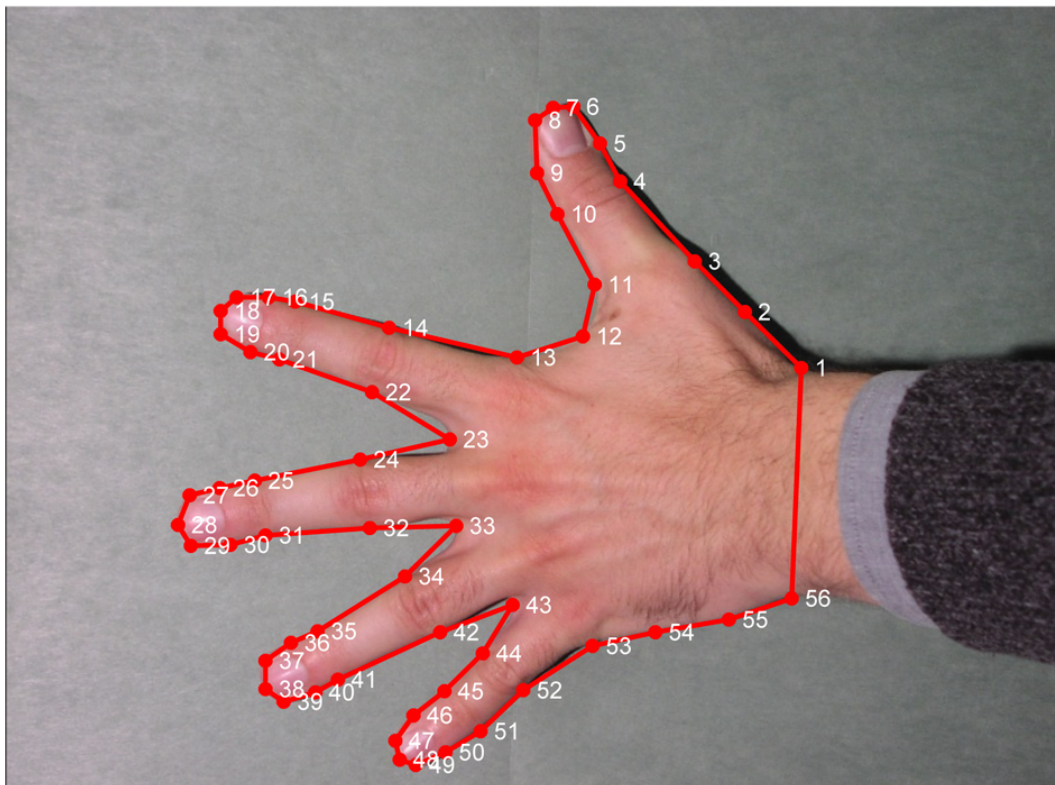
Tento typ analýzy umožňuje vzájemné zarovnání libovolně velkého souboru tvarů. Výpočet probíhá iterativním způsobem. V každé iteraci je nejprve vypočítán konsensus² zkoumaného souboru, následně je každý tvar pomocí obyčejné prokrústovské analýzy superponován na tento konsensus. Uvádí se, že pro zarovnání všech tvarů dostačují pouhé dvě iterace.

Tangentová projekce

Tvary zarovnané pomocí GPA se nacházejí v nelineárním prostoru, který má tvar hypersféry [13]. Protože většina statistických metod pracuje v lineárním prostoru, je potřeba zarovnané tvary linearizovat. K linearizaci slouží tangentová projekce, která změnou měřítka zobrazuje tvary z hypersféry do lineární hyperplochy. Na obrázku 3.3 je ukázka vlivu tangentové projekce na zarovnané obdélníky. Obdélníky vznikly z jednoho vzoru změnami poměru délek stran. Uprostřed je obrázek zarovnaných tvarů po samotné GPA, vpravo pak po korekci tangentovou projekcí.

¹průměrný bod tvaru, těžiště tvaru

²průměrný tvar



Obrázek 3.2: Ruka anotovaná 56 landmarky. Převzato z [22].

Analýza hlavních komponent (PCA)

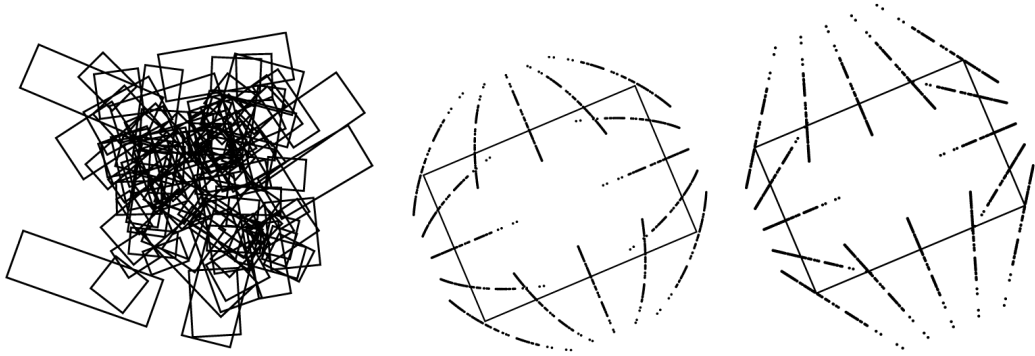
Cílem analýzy hlavních komponent je redukce dimenzionality vstupních dat, které je dosaženo jejich de Korelací [1]. Výsledkem aplikace analýzy na sadu zkoumaných tvarů, po zarovnání pomocí obecné prokrústovské analýzy a linearizaci tangentovou projekcí, bude parametrický model popisující variabilitu daného souboru tvarů. Takto vytvořený model se často nazývá jako *point distribution model* (PDM) [8]. Významným rysem výsledného statistického modelu je možnost generovat nové tvary, které nejsou v původní sadě. Nově generované tvary jsou *de facto* lineárními kombinacemi vlastních vzorků ve zkoumané sadě:

$$X' = \bar{X} + Pb \quad (3.1)$$

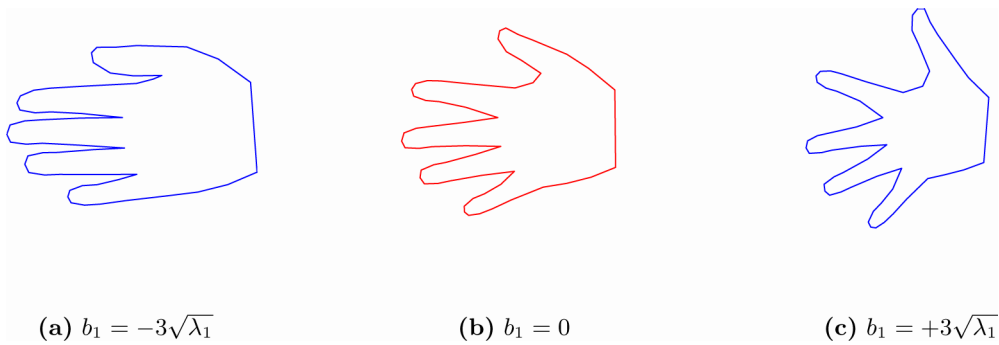
kde X' je nově generovaný tvar, \bar{X} je průměrný tvar, P je transformační matice a b je vektor obsahující hodnoty hlavních komponent. Obrázek 3.4 ilustruje generování nových tvarů změnou hodnot hlavní komponenty statistického modelu. Variabilita vzorků v trénovací sadě určuje kvalitu výsledného modelu ve smyslu, jaké množství neviděných a zároveň reálných tvarů je schopen vygenerovat.

Pravděpodobnostní analýza hlavních komponent (PPCA)

PPCA je rozšíření klasické analýzy hlavních komponent umožňující pracovat i s nekompletními daty [20]. Kromě vstupních dat je nutné metodě zadat i dimenzionalitu prostoru hlavních komponent, do kterého jsou vstupní data transformována. Pravděpodobnostní PCA je



Obrázek 3.3: Ukázka vlivu tangentové projekce na zarovnané obdélníky. Převzato z [22].



Obrázek 3.4: Nově generované tvary změnou hodnoty hlavní komponenty. Převzato z [22].

ve své podstatě kombinací klasické PCA a EM algoritmu [19]. Na PPCA může být nahlíženo jako na iterativní metodu, která současně provádí odhad prostoru hlavních komponent a rekonstrukci chybějících hodnot v tomto prostoru. Vzorek s může být popsán následujícím způsobem:

$$s = Wx + \mu + \epsilon \quad (3.2)$$

nebo-li vzorek s je dán součtem lineárního mapování latentní proměnné x , průměrným vzorkem μ a gaussovským šumem ϵ . Lineární mapování W je nalezeno pomocí Expectation-Maximization algoritmu, který se skládá ze dvou kroků. V prvním kroku (E-kroku) se počítá matice X latentních proměnných x :

$$X = W^T W^1 W^T S \quad (3.3)$$

kde W je aktuální lineární mapování a S je matice pozorovaných dat. Ve druhém kroku (M-kroku) se aktualizuje lineární mapování W :

$$W^{new} = S^T X^T (X X^T)^{-1} \quad (3.4)$$

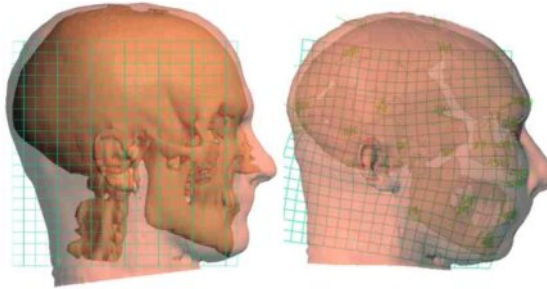
EM algoritmus umožňuje rozšíření E-kroku tak, aby mohla být zpracována i nekompletní data. Nalezení kompletního vektoru s k nekompletnímu pozorování s^* řeší PPCA hledáním takového páru x, s^* , aby $\|Wx - s^*\|^2$ byla minimální. Kompletní vektor s je získán jednoduše násobením $s = Wx$. Každou iterací algoritmu se přesnost rekonstrukce zlepšuje díky lepšímu odhadu W .

3.2 Porovnání tvarů

Tato sekce se věnuje dvěma metodám pro porovnání tvaru, v prvním případě definovaného pomocí landmarků a v druhém pomocí polygonálního modelu. Pro obě metody platí, že objekty musí být před porovnáním sesouhlaseny.

Thin-plate spline

Thin-plate spline [5] je metoda pro analýzu tvaru, jejímž primárním účelem je porovnání rozdílnosti dvou tvarů pomocí elastické deformace pravoúhlé mřížky. Metoda byla odvozena od virtuální deformace nekonečně dlouhého a nekonečně tenkého kovového plátu. Uvedena byla F. Booksteinem v roce 1989. Vedle vizuálního porovnání pomocí deformované mřížky metoda poskytuje i kvantitativní popis rozdílnosti tvarů pomocí velikosti deformační energie. Kromě analýzy 2D tvarů existuje i rozšíření pro 3D prostor. Metoda pracuje se dvěma objekty reprezentovanými sadou landmarků. Na základě korespondence mezi landmarky se vypočítají koeficienty nerigidní transformace, pomocí které lze mapovat veškeré body z prvního tvaru do druhého. Pomocí mapování lze deformovat původní pravoúhlou mřížku. Tam, kde se mřížka nejvíce zdeformuje, jsou tvary nejvíce odlišné. Ukázka metody je na obrázku 3.5, který ilustruje rozdíl mezi lebkou moderního člověka a neandrtálce zmíněnou deformací mřížky.



Obrázek 3.5: Ukázka TPS metody na srovnání tvaru lebky moderního člověka (vlevo) a lebky neandrtálce (vpravo). Převzato z [28].

Před výpočtem koeficientů thin-plate spline deformace je potřeba zkoumané tvary zarovnat pomocí obyčejné prokrústovské analýzy. Koeficienty interpolační funkce obsahují členy jak pro afinní část transformace, která se projeví rotací, posunem či zvětšením mřížky, tak i pro neafinní, jež mají za následek přehnutí mřížky. Interpolační funkce pro 3D prostor má následující tvar:

$$f_i(x, y, z) = a_{i1} + a_{ix}x + a_{iy}y + a_{iz}z + \sum_{j=1}^p w_{ij}U(\|(x_j, y_j, z_j) - (x, y, z)\|) \quad (3.5)$$

kde výsledkem f_i je hodnota souřadnice i interpolovaného bodu $[x, y, z]$. Koeficienty a určují afinní část transformace, koeficienty w určují přehnutí mřížky, p značí počet landmarků. U je radiální básová funkce, ve 3D variantě TPS definovaná jako

$$U(z) = -|z| \quad (3.6)$$

Pro 2D případy má radiální bázová funkce tvar $U(z) = z^2 \log(z^2)$. Koeficienty pro deformaci mezi dvěma objekty se vypočítají pomocí inverzí matice deformačních energií L . Matice L má rozměry $(p+4) \times (p+4)$, kde p značí počet landmarků.

$$L = \begin{pmatrix} K & P \\ P^T & O \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Matice K obsahuje hodnoty bázové funkce U , jejímž argumentem jsou eukleidovské vzdálenosti mezi landmarky na prvním tvaru.

$$K = \begin{pmatrix} \lambda & U(r_{12}) & \dots & U(r_{1n}) \\ U(r_{21}) & \lambda & \dots & U(r_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U(r_{n1}) & U(r_{n2}) & \dots & \lambda \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Parametr λ určuje přesnost aproximace. Pokud bude jeho hodnota nulová, půjde o přesnou aproximaci, nebo-li korespondující landmarky obou objektů budou mít totožné souřadnice. Matice O má rozměr 4×4 a obsahuje pouze nulové prvky. Matice P obsahuje souřadnice landmarků prvního tvaru a má podobu:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & y_n & z_n \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Pokud jsou landmarky z druhého objektu sepsány do matice:

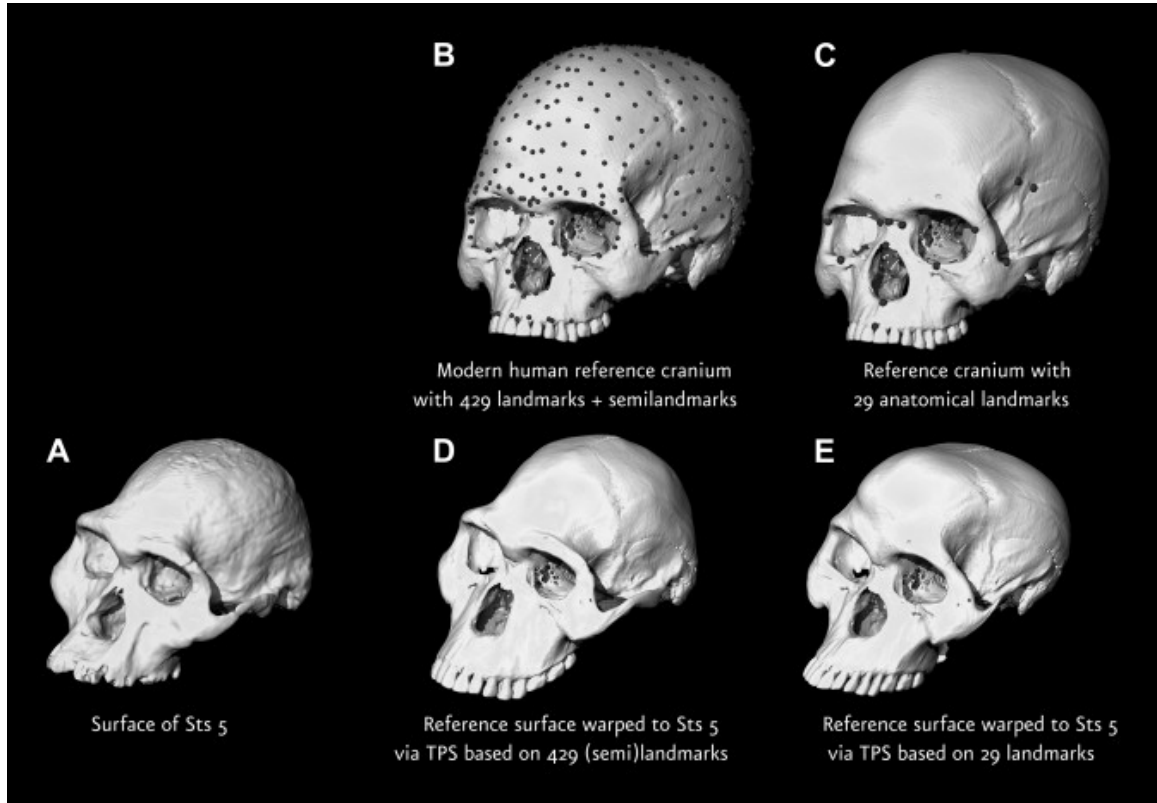
$$V = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & z_3 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

pak se matice transformačních koeficientů získá maticovým násobením invertované matice L s maticí V :

$$L^{-1}V = \begin{pmatrix} w_{x1} & w_{y1} & w_{z1} \\ w_{x2} & w_{y2} & w_{z2} \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{xn} & w_{yn} & w_{zn} \\ a_{x1} & a_{y1} & w_{z1} \\ a_{xx} & a_{yx} & w_{zx} \\ a_{xy} & a_{yy} & w_{zy} \\ a_{xz} & a_{yz} & w_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Vypočítané koeficienty lze následně doplnit do funkce 3.5 a spočítat mapování libovolného bodu z prvního objektu do druhého. Interpolací bodu $[x, y, z]$ bude bod se souřadnicemi $[f_x(x), f_y(y), f_z(z)]$.

Deformovaným objektem nemusí být pouze mřížka, ale jakákoli množina bodů. Lze například pomocí několika význačných bodů deformovat celý polygonální model tak, aby se co nejvíce podobal jinému vybranému modelu, registrovat jeden model k druhému. Deformace polygonálního modelu pomocí TPS je ilustrována na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Deformace lebky pomocí semilandmarků a TPS warpingu. (A) Cílová lebka, (B) původní lebka obsahující 429 landmarků a semilandmarků, (C) původní lebka obsahující 29 landmarků (D) výsledek deformace lebky pomocí 429 landmarků a semilandmarků, (E) výsledek deformace při použití 29 landmarků. Převzato z [17].

Porovnání polygonálních modelů

Polygonální modely lze porovnávat pomocí Hausdorffovy vzdálenosti [3]. Formálně je polygonální model \mathcal{M} popsán množinou vrcholů sítě $\mathcal{P} \subset \mathbb{R}^3$ a množinou \mathcal{T} trojúhelníků popisujících propojení vrcholů z \mathcal{P} . S a S' označují spojitě povrchy. Následně je možné definovat vzdálenost mezi bodem ležícím v povrchu S a povrchem S' :

$$d(p, S') = \min_{p' \in S'} \|p - p'\| \quad (3.12)$$

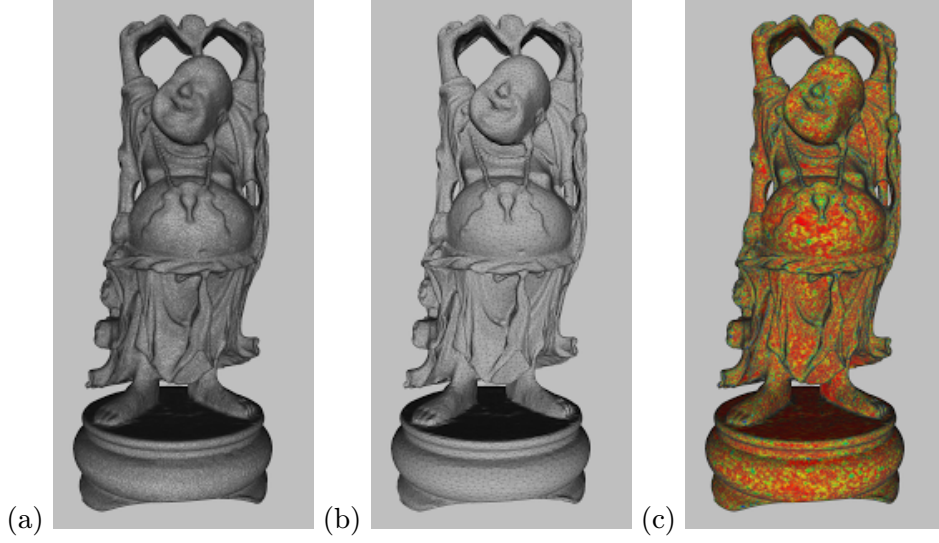
a poté Hausdorffovu vzdálenost mezi povrchy S a S' :

$$d(S, S') = \max_{p \in S} d(p, S') \quad (3.13)$$

Je vhodné poznamenat, že takto definovaná vzdálenost není symetrická, nebo-li $d(S, S') \neq d(S', S)$. Vzdálenost $d(S, S')$ se označuje jako dopředná a $d(S', S)$ jako zpětná. Je užitečné definovat symetrickou Hausdorffovu vzdálenost mezi dvěma povrchy:

$$d_s(S, S') = \max[d(S, S'), d(S', S)] \quad (3.14)$$

Výpočet vzdálenosti dvou diskrétních povrchů $\mathcal{M} = (\mathcal{P}, \mathcal{T})$ a $\mathcal{M}' = (\mathcal{P}', \mathcal{T}')$ vyplývá z předchozích definic. Vzdálenost bodu $p \in \mathcal{P}$ od diskrétního povrchu \mathcal{M}' se vypočítá jako minimální ze vzdáleností bodu p od všech trojúhelníků $t \in \mathcal{T}'$. Pokud ortogonální průmět p'



Obrázek 3.7: Soška budhy (a) s původním počtem polygonů, (b) decimovaná polygonální síť, (c) vizualizace rozdílu mezi původním a zjednodušeným modelem. Převzato z [37].

bodů $p \in \mathcal{P}$ do roviny určené trojúhelníkem $t \in T'$ leží uvnitř trojúhelníku t , pak se jako vzdálenost $d(p, t)$ bere jednoduše vzdálenost bodů p a p' . Pokud průmět leží mimo trojúhelník, bere se vzdálenost bodu p a nejbližšího bodu p'' náležícího t . Tuto vzdálenost lze určit analyticky. Při určování dopředné vzdálenosti modelů se trojúhelníky \mathcal{M} navzorkují a pro každý bod se vypočítá vzdálenost k \mathcal{M}' .

Na základě vzdálenosti bodu od roviny popsané vzorcem 3.12 je možné definovat průměrnou vzdálenost mezi povrchy S a S' :

$$d_m(S, S') = \frac{1}{|S|} \int \int_{p \in S} d(p, S') dS \quad (3.15)$$

kde $|S|$ určuje velikost plochy S . Následuje definice směrodatné odchylky vzdálenosti dvou povrchů:

$$d_{RMSE}(S, S') = \sqrt{\frac{1}{|S|} \int \int_{p \in S} d(p, S')^2 dS} \quad (3.16)$$

Analogicky se docílí výpočtu pro diskrétní povrchy \mathcal{M} a \mathcal{M}' .

Metoda se používá například při vyhodnocování algoritmů pro decimaci polygonálních modelů. Velikost lokálních rozdílů mezi modely lze vizualizovat pomocí barevné škály, která je jako textura namapovaná na jeden z modelů, jak je ukázáno na obrázku 3.7.

3.3 Vytvoření statistického modelu a rekonstrukce objektů

V části o statistickém modelování byl tvar reprezentován pouze pomocí sady landmarků. V této části bude modelování rozšířeno na celé polygonální modely, ovšem stále s použitím landmarků. Budou představeny metody pro anotování modelů sadou landmarků, přiblížen pojem registrace modelů a nastíněny postupy pro rekonstrukci nekompletních modelů.

Anotování tvarů sadou landmarků

Prvním krokem při analyzování tvaru je anotace všech objektů zkoumaného souboru pomocí sady landmarků. Anotace může probíhat více způsoby, od manuálního přístupu, přes semi-automatické až k plně automatickým metodám.

Plně manuální anotace zahrnuje výběr sady landmarků, který se zpravidla odehrává v rukou odborníka na anatomii zvoleného objektu. Vybraná sada landmarků je posléze umístěna na všechny modely ve zkoumaném souboru. Situace je jednodušší, pokud se pracuje pouze s objekty ve dvourozměrném prostoru. Pro třídimenzionální polygonální modely je umisťování landmarků ztíženo manipulací s objektem.

Semi-automatické metody spočívají v ruční anotaci pouze určité části zkoumaného souboru. Z anotované části je možné vytvořit *Active shape model* (ASM) [9], s jehož pomocí lze najít pravděpodobné umístění landmarků na zbývajících modelech. ASM pracují s volumetrickými daty.

Plně automatické metody zpravidla nevyžadují žádný zásah od uživatele. Není proto nutné definovat sadu landmarků, což přináší jistá pozitiva i negativa. Výhody vyplývají zejména z úspory času, které lze dosáhnout. Ruční anotace velkého počtu landmarků bývá časově náročnou činností. Nevýhody vyplývají z omezení topologie zkoumaných modelů. Pro metody SPHARM[7], MDL[10] a *Sliding landmarks*[4], k dnešnímu datu označované jako *state-of-the-art*, jsou přípustné pouze objekty s topologií sféry, jinak řečeno objekty typu genus 0. Uvedené metody jsou použitelné pro generování semi-landmarků na objektech, jakými jsou např. hlavice kloubů, části mozku apod., kde nelze ruční anotací vyznačit uspokojivý počet anatomických či matematických landmarků.

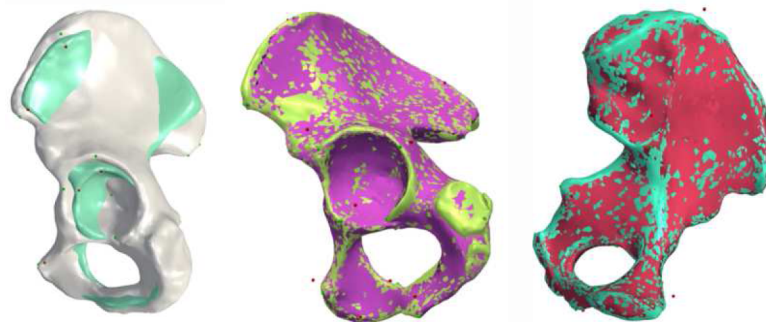
Registrace objektů

Aby bylo možné vytvořit statistický model, který není založen pouze na omezené sadě landmarků, je potřeba určit vzájemnou korespondenci bodů všech modelů ve zkoumané sadě. Korespondence je dosaženo pomocí registrace referenčního modelu na ostatní modely ve zkoumané sadě. V případě, že se jedná o polygonální modely, výsledkem bude nalezená korespondence vrcholů polygonální sítě mezi jednotlivými modely. Například, půjde-li o modely obličejů a na jednom z modelů bude označen vrchol sítě, ležící na špičce nosu, pak bude možné přesně určit tentýž vrchol i na ostatních modelech obličejů. Každý vrchol sítě se *de facto* stane semi-landmarkem. Pokud se pracuje s volumetrickou reprezentací modelů, pak se místo vrcholů sítě pracuje s jednotlivými voxely.

I když se v pracích Albrechta a Skadlubowicze přistupuje k registraci odlišně, jelikož v jednom případě se pracuje s volumetrickými a v druhém případě s polygonálními modely, jeden rys zůstává společný. Zmiňovaným rysem je výběr jednoho objektu za referenční, často nazývaný jako *atlas*. Atlas se registruje ke všem zbývajícím objektům. Po registraci atlasu jsou všechny modely reprezentovány stejnou polygonální sítí se shodným počtem vrcholů a je mezi nimi definována vzájemná korespondence jednotlivých bodů.

Albrecht ve spolupráci s dalšími kolegy předkládá vlastní algoritmus pro plně automatickou registraci objektů. Metoda se jmenuje *Curvature Guided Level Set Registration using Adaptive Finite Elements*[11], je založena na numerickém řešení diferenciálních rovnic a určena pro registraci volumetrických modelů.

Skadlubowicz oproti tomu pracuje s polygonálními modely a registraci neřeší nutně zcela automaticky. V jeho případě jsou na zkoumaném souboru pánví vyznačeny landmarky, které slouží ke vzájemnému zarovnání pánví a následné thin-plate spline deformaci referenčního



Obrázek 3.8: Reprezentace pánví různými deformacemi atlasu. Převzato z [21].

modelu na veškeré ostatní pánve. Všechny modely v sadě jsou od tohoto okamžiku reprezentovány různě deformovanou referenční pánví. Ukázka metody je na obrázku 3.8. Úplně vlevo je bílou barvou vykreslená referenční pánev, vybraná jako průměrný anatomický exemplář, zeleně je zobrazena cílová pánev. Uprostřed a zcela vpravo je atlas deformovaný na tvar cílových pánví.

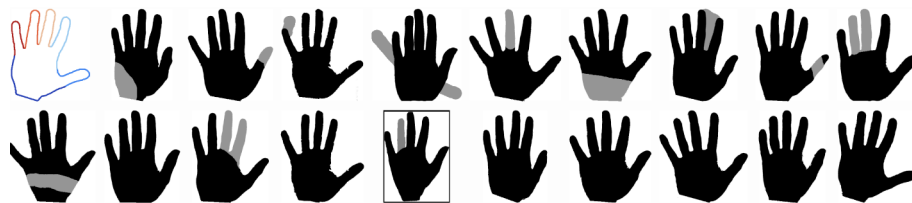
Rekonstrukce chybějících částí

Skadlubowicz rekonstruuje nekompletní pánev hledáním ideálních parametrů statistického modelu, které se tvarem co nejvíce blíží poškozené pánvi. Hledání nejpodobnější pánve spočívá ve zkoušení různých hodnot hlavních komponent statistického modelu a následném vizuálním srovnání tvaru poškozené a rekonstruované pánve. Celý proces probíhá manuálně. Statistický model je vytvořen ze sady nepoškozených pánví.

Oproti tomu Albrechtův přístup umožňuje sestavit statistický model automaticky. Navíc poskytuje možnost sestavení statistického modelu z poškozených objektů. Metoda pracuje s předpokladem, že registrace atlasu na nekompletní, či artefakty obsahující modely, povede k lokálně nepřírodným deformacím referenčního tvaru. Poškozené části lebky způsobí pouze lokální chyby registrace. Po registraci objektů je provedena analýza odlehlých hodnot, kritické hodnoty způsobené chybnou registrací jsou odstraněny a nahrazeny nejpravděpodobnější hodnotou. Ačkoli lze obecně použít libovolný algoritmus pro identifikaci a nahrazení uvedených hodnot, podle článku *Building Shape Models from Lousy Data* [20] je nejlepších výsledků dosaženo použitím metod PCOut [15] a pravděpodobnostní PCA (PPCA) [19]. Postup je ilustrován obrázky 3.9 a 3.10. Na obrázku 3.9 je datová sada 19 rukou, do kterých byly uměle vneseny artefakty, či u kterých byly některé části vynechány (zásahy jsou vyznačeny šedou barvou). Ruka uprostřed druhé řady, vyznačená rámečkem, byla dále rekonstruována pomocí PCOut a PPCA. Výsledek rekonstrukce je na obrázku 3.10. Černou barvou je značen obrys původního vzorku, červeně je zvýrazněna rekonstruovaná ruka obsahující automaticky doplněný prsteníček.

3.4 Identifikace odlehlých hodnot

Kromě metody PCOut existuje i řada dalších metod pro identifikaci odlehlých hodnot. Lze využít i shlukovací metody založené na hustotě, mezi které se řadí například Denclue [18] nebo DBSCAN [14].



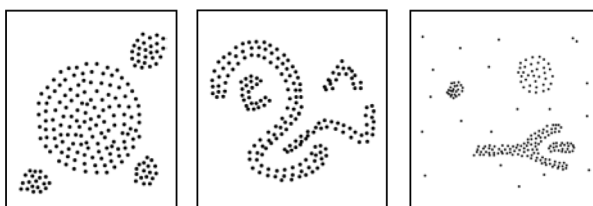
Obrázek 3.9: Datová sada rukou s artefakty a vynechanými místy. Převzato z [20].



Obrázek 3.10: Rekonstrukce nekompletní ruky doplněním prsteníčku. Převzato z [20].

Metoda DBSCAN

Na obrázku 3.11 jsou tři příklady shluků ve dvourozměrném prostoru. Na třetím příkladě zleva jsou vidět odlehle hodnoty, body, které nepatří ani k jednomu z vyobrazených shluků. Intuitivně lze shluky snadno odhalit, na první pohled jde o místa, kde je hustota bodů výrazně vyšší než v jejich okolí. Navíc, hustota bodů v místech, která jsou od shluků odlehlá, je výrazně nižší než uvnitř shluků.



Obrázek 3.11: Příklady shluků v dvourozměrném prostoru. Převzato z [14].

Aby bylo možné shluky algoritmicky identifikovat, je zapotřebí zavést jejich formální popis. Metoda DBSCAN formalizuje shluky a odlehle hodnoty na základě myšlenky, že každý bod shluku má své okolí o daném průměru a v tomto okolí se nachází nejméně určitý počet dalších bodů. Jinak řečeno, hustota bodů v tomto okolí musí překročit stanovený práh. Tvar okolí je určen použitou metrikou určující vzdálenost dvou bodů. Například, pokud bude použita Manhattanovská vzdálenost ve 2D prostoru, pak bude mít okolí bodu obdélníkový tvar. Metoda je schopna pracovat s jakoukoli metrikou. Dále se bude implicitně počítat s variantou, že zvolenou metrikou je Eukleidovská vzdálenost. Formalizace shluku se opírá o následující definice:

Definice 3 ϵ -okolí bodu p , označené jako $N_\epsilon(p)$, je definováno jako množina bodů $N_\epsilon(p) = \{q \in D \mid \text{dist}(p, q) \leq \epsilon\}$.

Naivní způsob definice shluku by mohl říkat, že každý bod obsažený ve shluku má ve svém ϵ -okolí minimálně určitý počet (MinPts) dalších bodů. Naivní úvaha ale není zcela správná, protože ve shlucích existují dva typy bodů. Jednak jde o vnitřní body a potom o body ležící

na hranicích shluku. Obecně lze předpokládat, že ϵ -okolí bodů ležících na hranici shluku bude obsahovat výrazně menší počet sousedících bodů, než ϵ -okolí bodů ležících uvnitř shluků. Možným řešením by bylo nastavit množství bodů v ϵ -okolí na poměrně nízkou hodnotu odpovídající hraničním bodům. Nízká hodnota však nebude zcela charakteristická pro daný shluk, navíc může způsobovat problémy v případě přítomnosti odlehlých hodnot. Proto se zavádí další definice, která říká, že pro každý bod p ve shluku existuje takový bod q , že ϵ -okolí q obsahuje bod p a zároveň toto okolí obsahuje minimálně $MinPts$ bodů.

Definice 4 *Bod p je přímo dosažitelný na základě hustoty z bodu q právě a pouze tehdy, když $p \in N_\epsilon(q) \wedge ||N_\epsilon \geq MinPts$.*

Pro body ležící uvnitř shluku je přímá dosažitelnost na základě hustoty symetrická, pokud je bod p přímo dosažitelný z bodu q , bude to platit naopak. Symetrie však neplatí obecně, porušena bude v případě, kdy jeden z bodů bude ležet na hranici shluku. Pokud bude bod p ležet uvnitř shluku a bod q na hranici shluku, pak q bude přímo dosažitelný z bodu p , avšak bod p nebude přímo dosažitelný z bodu q .

Definice 5 *Bod p je dosažitelný na základě hustoty z bodu q , pokud existuje řetězec bodů p_1, \dots, p_n , $p_1 = q$, $p_n = p$ takový, že bod p_{i+1} je přímo dosažitelný z bodu p_i .*

Toto rozšíření přímé dosažitelnosti je tranzitivní, stále je ale nesymetrické. Symetrie jako v předchozím případě platí v případě, že body p a q leží uvnitř shluku, nikoli na jeho hranici. Dva hraniční body stejného shluku nemusejí být navzájem dosažitelné na základě hustoty. Musí však existovat takový vnitřní bod daného shluku, ze kterého jsou oba hraniční body dosažitelné na základě hustoty. Proto se zavádí pojem spojení na základě hustoty, který zastřešuje spojení bodů ležících na hranicích shluku.

Definice 6 *Bod p je spojený na základě hustoty s bodem q v případě, že existuje takový bod o , ze kterého jsou oba body p a q dosažitelné na základě hustoty.*

Relace spojení na základě hustoty je symetrická.

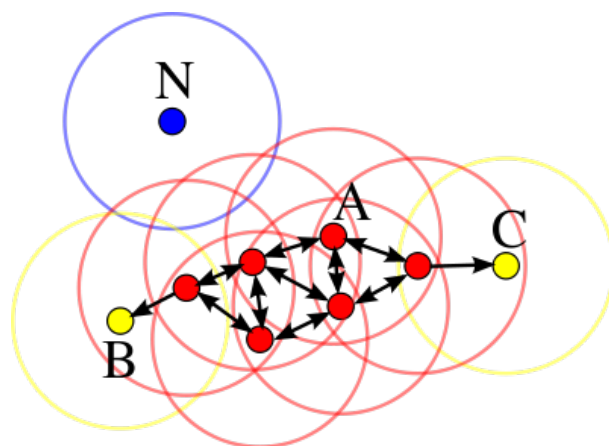
Nyní je možné předložit definici samotného shluku založeného na hustotě. Intuitivně může být shluk definován jako maximální množina bodů vzájemně spojených na základě hustoty. Odlehlé hodnoty budou definovány jako body, které nepatří ani k žádnému z identifikovaných shluků.

Definice 7 *Nechť D je databáze bodů. Shluk C s danými parametry ϵ a $MinPts$ je neprázdná podmnožina D vyhovující následujícím podmínkám:*

1. $\forall p, q$: pokud $p \in C$ a q je dosažitelný na základě hustoty z bodu p , pak musí platit, že $q \in C$.
2. $\forall p, q \in C$: p je spojeno na základě hustoty s bodem q .

Předešlé definice jsou názorně ilustrovány na obrázku 3.12.

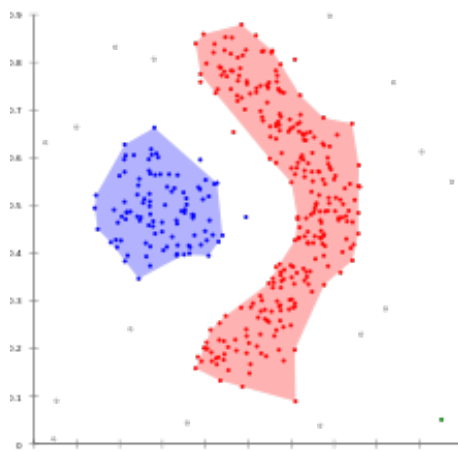
Algoritmus vyžaduje dva vstupní parametry, a to velikost ϵ -okolí a minimální počet bodů $MinPts$ v tomto okolí. Nejdříve se vybere náhodný bod, který zatím nebyl zkoumán. Prověří se jeho ϵ -okolí a pokud obsahuje dostatečné množství dalších bodů, je založen nový shluk. V opačném případě je bod označen jako odlehlá hodnota. Později však může být zařazen do nějakého ze shluků, neboť se může jednat o bod na okraji shluku. Pokud tedy bod ve svém okolí obsahuje dostatek dalších bodů, jsou tyto body rovněž zařazeny do



Obrázek 3.12: Červené body (označené písmenem A) jsou vnitřní body shluku (tzv. *core points*) a jsou navzájem přímo dosažitelné na základě hustoty. Žluté body B a C leží na hranicích shluku a jsou dosažitelné na základě hustoty z bodu A. Díky tomu jsou body B a C spojené na základě hustoty. Modrý bod N symbolizuje odlehlou hodnotu. Převzato z [29].

shluku, následně jsou přidány body z jejich ϵ -okolí atd. Tento proces pokračuje tak dlouho, dokud nejsou všechny body, spojené na základě hustoty s bodem, který byl na začátku náhodně vybrán, přidány do shluku. Poté se vybere další náhodný neprozkoumaný bod a celý postup se opakuje.

Mezi hlavní výhody patří schopnost identifikovat i nekonvexní shluky, jako mohou být lineární shluky atd. Příklad takových shluků je na obrázku 3.13. Naopak mezi zápory by se dala zařadit nutnost odhadnout parametry ϵ a MinPts.



Obrázek 3.13: Příklad nekonvexních shluků, které lze pomocí metody DBSCAN identifikovat. Převzato z [29].

Kapitola 4

Anatomie lebky

Tato kapitola se zabývá vysvětlením vybraných pojmů z anatomického názvosloví [6], které se budou v práci dále objevovat. Uvedené pojmy zazní zejména v kapitole 5.2, která se zabývá výběrem sady landmarků.

4.1 Kraniometrické body

Často se lze kromě výše uvedeného pojmu *landmark* setkat i s označením *antropometrický bod*. Pojem *landmark* se používá zejména v kontextu geometrické morfometrie. Jak bylo zmíněno v části 3.1, *landmarky* lze rozdělit do tří kategorií. Bookstein [24] definuje následující typy *landmarků*:

- **typ 1**, ke kterému se řadí body nazývané jako anatomické *landmarky*,
- **typ 2**, značící matematické *landmarky*,
- **typ 3**, kam se řadí body zkonstruované na základě bodů předchozích dvou typů.

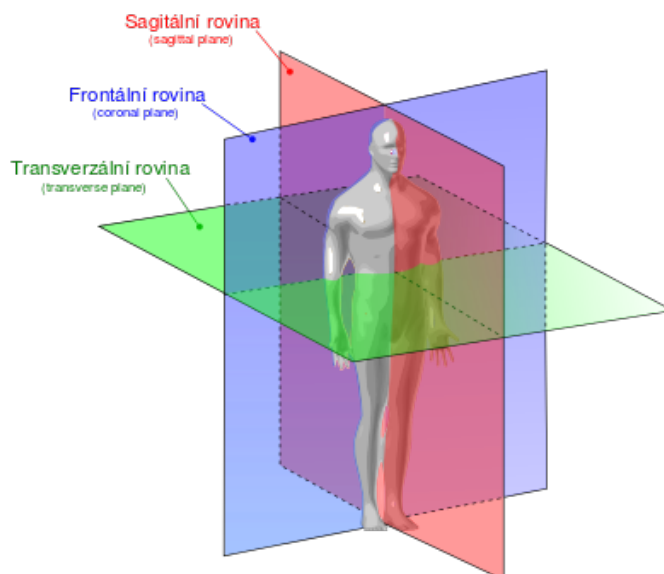
Anatomické *landmarky* jsou body nesoucí určitý biologický význam. Příkladem mohou být body ležící na spojení švů¹ na lebce. Matematické *landmarky* jsou body ležící na geometricky významných místech, v lokálních extrémech vzniklých působením lokálního biomechanického tlaku. Příkladem může být *landmark* inion, umístěný na zevním týlním výběžku, nebo *landmark* akanthion, ležící na spina nasalis anterior.

Pseudolandmarky byly definovány později a nepatří tedy k původnímu rozdělení bodů do tří kategorií. Prakticky ale mohou být zařazeny k *landmarkům* třetího typu [34]. Typicky jde o rovnoměrně rozmístěné body ležící na spojnici dvou anatomických *landmarků*, nebo například rovnoměrné navzorkování vymezené plochy. Účelem pseudolandmarků může být získání většího počtu informací o zkoumaném tvaru.

4.2 Vybrané anatomické roviny a směry

Definovány jsou tři základní roviny. Jedná se o rovinu sagitální, transversální a frontální. Všechny uvedené roviny jsou navzájem ortogonální. Mediánní rovina rozděluje lidské tělo na dvě souměrné poloviny, viz. obrázek 4.2 a jde o speciální typ sagitální roviny. *Landmarky* mohou být tzv. bilaterální, jinak řečeno zrcadlově souměrné podle mediánní roviny.

¹latinsky se šev označuje jako sutura



Obrázek 4.1: Anatomické roviny u člověka. Převzato z [39], ověřeno podle [12].

Pomocí zmíněných rovin jsou definovány základní směry, které je následně možné využít při popisu polohy antropometrických bodů. Ze všech existujících popisů směrů jsou zde vybrány pouze ty, které se budou objevovat v dalším textu. Uvedené směry lze rozdělit do tří skupin:

1. směry kolmé na transverzální rovinu,
2. směry kolmé na frontální rovinu,
3. směry kolmé na mediánní rovinu.

Do první skupiny patří směr kraniální a kaudální. Kraniální směr míří nahoru směrem k hlavě². Kaudální³ směr míří od hlavy dolů.

Do druhé skupiny se řadí směry ventrální, tzn. přední a dorzální, tzn. zadní.

Do směrů kolmých na mediánní rovinu patří sagitální směr, mířící od středu těla a mediální směr, mířící ke středu těla. Bilaterální landmarky leží na pravé i levé půlce těla, body na pravé polovině se označují jako dexter, body ležící na levé polovině se označují jako sinister.

4.3 Části lebky

Lidská lebka sestává z obličejové⁴ a mozkové⁵ části. Mozkovou část je možné dále rozdělit na bázi lebky, tzv. spodinu lební⁶, viz. obrázek 4.2a, a na lební klenbu⁷, obrázek 4.2b.

²cranium je v latině lebka bez dolní čelisti, mandibuly

³cauda znamená latinsky ocas

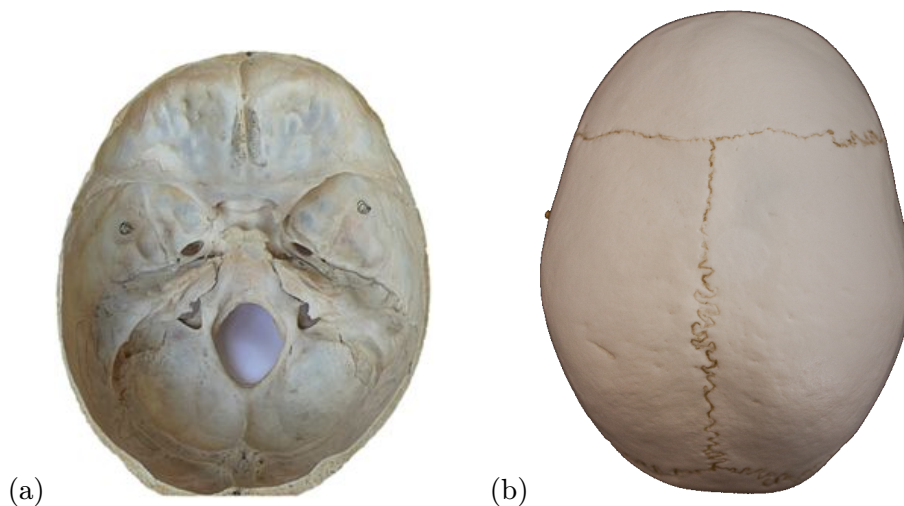
⁴latinsky viscerocranium

⁵latinsky neurocranium

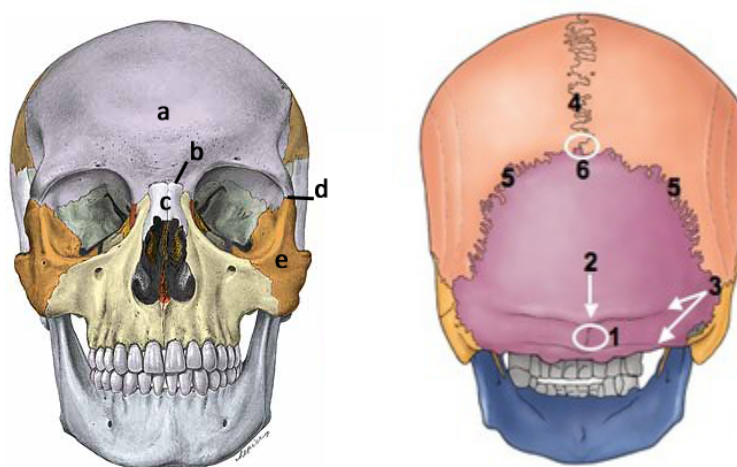
⁶latinsky basis cranii

⁷latinsky calvaria cranii

Jednotlivé kosti lebky jsou k sobě připojeny suturami. Z hlediska další kapitoly je významná frontonasální sutura, spojující čelní⁸ a nosní⁹ kost v obličejové části, a frontozygomatická sutura, spojující čelní a lící¹⁰ kosti. V zadní části lebky potom šířový a lambdový šev. Zmíněné pojmy jsou ilustrovány na obrázku 4.3.



Obrázek 4.2: Na obrázku vlevo (a) je znázorěna báze lebky [40], na obrázku vpravo (b) je lební klenba [33].



Obrázek 4.3: Na obrázku vlevo je lebka z ventrálního pohledu [41]. Vyznačena je (a) čelní kost, (b) frontonasální sutura, (c) nosní kost, (d) frontozygomatická sutura, (e) lící kost. Na obrázku vpravo je lebka z dorzálního pohledu [27]. Vyznačeny jsou (1) zevní týlní výběžek, (2) antropometrický bod inion, (3) superiorní a inferiorní nuchální linie, (4) šířový šev, (5) lambdový šev, (6) antropometrický bod lambda.

⁸latinsky os frontale

⁹latinsky ossa nasalia

¹⁰latinsky os zygomaticum

Kapitola 5

Návrh řešení

Kapitola obsahuje popis navržené metody pro rekonstrukci poškozených lebek. Metoda spočívá ve vytvoření statistického modelu tvaru lebky, schopného generovat polygonální modely kompletních nezraněných lebek, přičemž trénovací sada s výjimkou jediného vzorku obsahuje pouze poškozené a nekompletní lebky. Navržené řešení počítá se zásahy uživatele do procesu sestavení statistického modelu, rekonstrukce lebky probíhá semiautomaticky. Snahou je, aby zásahy uživatele byly co nejjednodušší a přitom měly pro sestavení modelu co možná největší přínos, jak z hlediska přesnosti, tak i z hlediska rychlosti. Manuální činnosti nalézají uplatnění tam, kde automatické metody z hlediska rychlosti a přesnosti zaostávají.

5.1 Fáze a kroky navrhované metody

Z hlediska nutnosti interakce s uživatelem lze metodu rozčlenit do tří fází:

1. ruční anotace sady modelů pomocí definovaných landmarků,
2. spuštění samotné rekonstrukce, která dále proběhne automaticky,
3. ruční dopracování výsledků rekonstrukce do finální podoby implantátu.

Účelem první fáze je předzpracování dat, připravení trénovací sady pro další automatické zpracování. Druhá fáze probíhá bez zásahů uživatele a jejím výsledkem je polygonální model ve zvolené kvalitě, sloužící jako předloha pro další domodelování implantátu. Posledním krokem je ruční domodelování protézy podle získané předlohy.

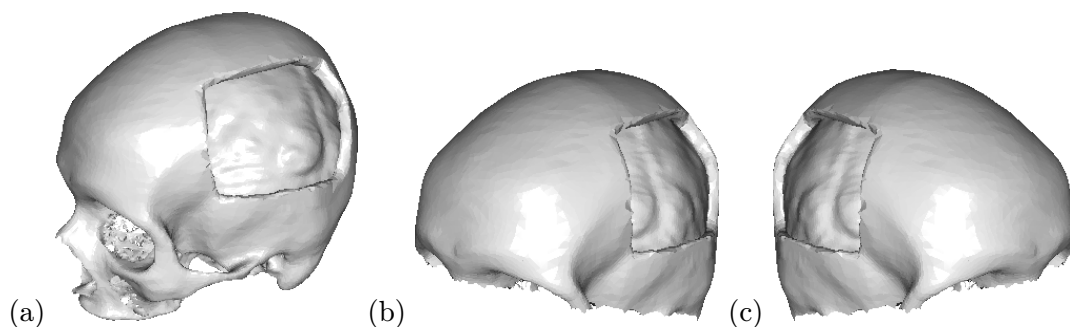
Hlavní kroky metody

Následující odstavce popisují stručný přehled a shrnutí hlavních kroků navrhované metody. Jednotlivým krokům se budou detailněji věnovat další podkapitoly.

Předzpracování dat uživatelem spočívá v zajištění polygonálních modelů lebek o přibližně stejném počtu polygonů a následnou anotací jednotlivých vzorků pomocí definované sady landmarků. Sada obsahuje celkem 8 landmarků, které by měly být relativně snadno vyznačitelné i pro běžného uživatele.

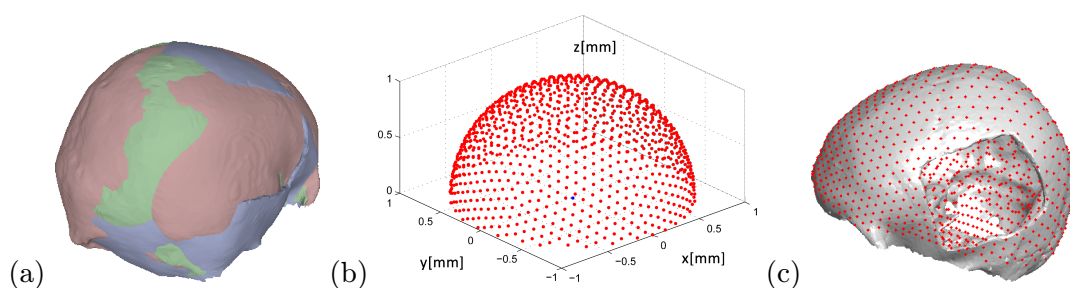
Během prvního kroku automatické části rekonstrukce jsou lebky oříznuty tak, aby se dále mohlo pracovat pouze s klenbou lebky, jak ukazuje obrázek 5.1b. Cílem tohoto kroku je snížení výpočetní náročnosti a také odstranění složitých částí lebky. Po oříznutí se všechny

modely v rekonstruované sadě zrcadlí, aby došlo ke zvětšení datové sady a aby statistický model počítal se symetrií modelů, viz. obrázek 5.1c.



Obrázek 5.1: (a) Původní zraněná lebka, (b) z původní lebky je dále zpracovávána pouze klenba, (c) všechny lebky v sadě se zrcadlí.

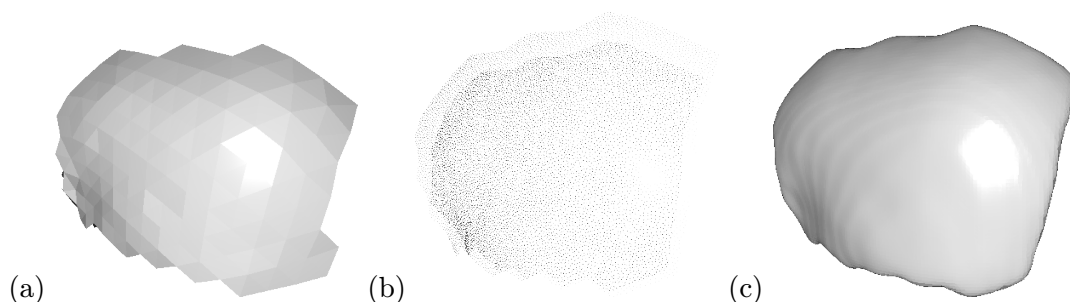
Veškeré polygonální modely v sadě se zarovnají na základě ručně vyznačených landmarků pomocí zobecněné prokrústovské analýzy. Situaci ilustruje obrázek 5.2a. Následuje projekce pseudolandmarků na jednotlivé lebky. Na hemisféře se vygenerují rovnoměrně rozložené pseudolandmarky, obrázek 5.2b, hemisféra se přidá do sady zarovnaných modelů a pseudolandmarky se projektují na každou z lebek. Některé z nich se mohou projektovat do nesprávných míst, hlavně na bázi lebky a na okraje zranění. Tyto body je nutné odstranit. Body na bázi lebky lze identifikovat shlukovací metodou DBSCAN, body na okrajích zranění buď odstraněním bodů sousedících s chybějícími body, popř. ručně. Následně se chybějící body rekonstruují pomocí pravděpodobnostní analýzy hlavních komponent, jak ukazuje obrázek 5.2c.



Obrázek 5.2: (a) Lebky zarovnané pomocí zobecněné prokrústovské analýzy, (b) pseudolandmarky vzniklé rovnoměrným vzorkováním sféry, (c) projektované a odhadnuté pseudolandmarky na lebce určené k rekonstrukci.

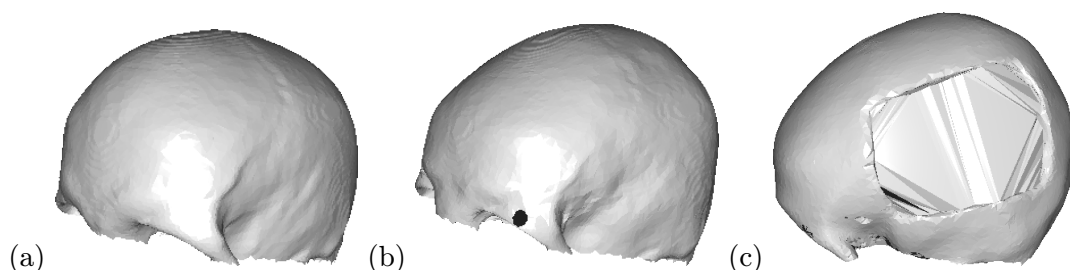
Body lze využít k vytvoření první předlohy pro implantát, vyexportováním povrchu projektované hemisféry, navzorkováním a rekonstrukcí. Postup rekonstrukce ukazuje obrázek 5.3.

Druhou možností je sestavit statistický model nezaložený pouze na pseudolandmarcích, ale přímo na polygonálních modelech. K tomu je potřeba mít kompletní, nepoškozenou referenční lebku, jako je na obrázku 5.4a. Lebka je postupně registrována na ostatní vzorky v sadě. Registrace probíhá s využitím dříve získaných pseudolandmarků a thin-plate spline deformace, viz. obrázek 5.4b. Nejdříve je referenční lebka podle pseudolandmarků deforma-



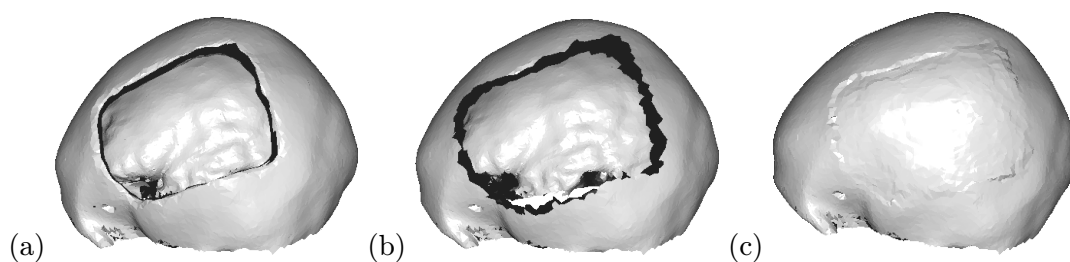
Obrázek 5.3: (a) Plochy tvořené odhadnutými pseudolandmarky, (b) vzorkování předchozích ploch, (c) rekonstrukce povrchu pomocí získaných vzorků.

vána na cílový objekt. Cílový objekt je navzorkován a k vrcholům referenčního polygonálního modelu jsou pomocí algoritmu KD-tree [16] nalezeny nejbližší body. Tím je zajištěna korespondence mezi jednotlivými modely. Výsledek registrace je na obrázku 5.4c.



Obrázek 5.4: (a) Referenční lebka, (b) referenční lebka deformovaná pomocí TPS warpingu na tvar cílové lebky, (c) referenční lebka registrovaná na cílovou lebku.

Chybějící části lebky mají na registraci lokální vliv. Chybně registrované body lze odstranit opět pomocí shlukovací metody DBSCAN. Následně se musí odstranit i hrany zranění. Pozice odstraněných vrcholů se odhadnou pomocí PPCA. Postup je ilustrovaný obrázkem 5.5.



Obrázek 5.5: (a) Odstranění chybně registrovaných bodů metodou DBSCAN, (b) odstranění hrany zranění, (c) rekonstrukce chybějících vrcholů pomocí PPCA.

Na rekonstruovaných lebkách mohou vznikat nepřírozené hrany. Hrany je možné odstranit vynulováním určitého počtu hlavních komponent, které modelují malé množství variability statistického modelu.

Třetí fáze – ruční domodelování implantátu podle získané předlohy – není předmětem řešení této práce.

5.2 Anotace sadou landmarků a zarovnání modelů

Jak bylo uvedeno výše, prvním krokem k sestavení statistického modelu tvaru je zarovnání vzorků pomocí zobecněné prokrústovské analýzy. Jedním ze způsobů jak polygonální modely zarovnat, je vyznačit na nich určitý počet landmarků, na jejichž základě bude zarovnání modelů prováděno. Přesněji řečeno, transformace pro jednotlivé modely budou určovány pouze na základě vyznačených landmarků, transformovány ale budou kromě landmarků celé polygonální modely, určené transformace budou aplikovány na všechny vrcholy daného polygonálního modelu.

Zobecněná prokrústovská analýza bude mít vliv na velikost modelů lebek. Jak bylo uvedeno v části 2, jedním z kroků GPA je standardizace tvaru na centroidovou velikost. Výsledkem standardizace je, že součet vzdáleností od těžiště ke všem landmarkům daného tvaru bude roven 1. V případě modelů lebek, které mají souřadnice udávané v milimetrech, tak dojde k razantnímu zmenšení modelů. Zmenšení je patrné například na histogramech 5.11, které udávají rozložení vzdáleností vybraných pseudolandmarků od středu lebky. Z histogramů vyplývá, že vzdálenost od středu na povrch lebky se pohybuje zhruba okolo 1 mm, což je následek zmíněné standardizace.

Protože anotace 3D modelů je činnost, která si vyžaduje určitou dávku zručnosti, je sada landmarků navržena s ohledem na to, aby obsahovala co možná nejmenší počet landmarků a zároveň aby tato minimální sada vedla k dobrému zarovnání lebek. Dále jsou landmarky v sadě vybrány tak, aby je zvládnul vyznačit i uživatel, který není odborníkem na anatomii, a aby byly vyhledatelné na všech modelech v sadě. To znamená, že nebyly voleny body například ve spodní části lebky, která občas nebývá na CT skenu k dispozici. Vyřazeny byly i body, které jsou z anatomického hlediska příliš variabilní, např. v místech, kde se na lebku upínají svaly. Finální sada obsahuje celkem 8 landmarků, z nichž jsou dva páry landmarků bilaterální. Základní přehled landmarků vybraných do zvolené sady obsahuje tabulka 5.2.

Číslo v sadě	landmarku	Název landmarku	Bilaterální	Část lebky
1,3		Frontomalare anterior	Ano	Horní faciální skelet
2		Nasion	Ne	Horní faciální skelet
4,6		Porion	Ano	Lební klenba
5		Basion	Ne	Báze lebky
7		Inion	Ne	Lební klenba
8		Lambda	Ne	Lební klenba

Tabulka 5.1: Přehled landmarků ve zvolené sadě.

Landmarky musí být na všech modelech v trénovací sadě vyznačeny v tom pořadí, v jakém jsou číslovány. Na žádném modelu zařazeném do zkoumané sady nemůže žádný z těchto uvedených landmarků chybět. Při anotaci lebek je důležité umisťovat landmarky v souladu s jejich definicemi. Definice jednotlivých landmarků jsou následující:

- 1, 3 Frontomalare anterior (sin, dx)** Body ležící nejvíce vpředu na pravé a levé frontozygomatické sutuře. Frontozygomatické sutury nebývají na vysegmentovaných leb-

kách patrné. Jejich pozice je většinou odhadnuta do míst, kde klenba očí zaznamenává nejvýraznější zlom. Ukázka je na obrázku 5.7.

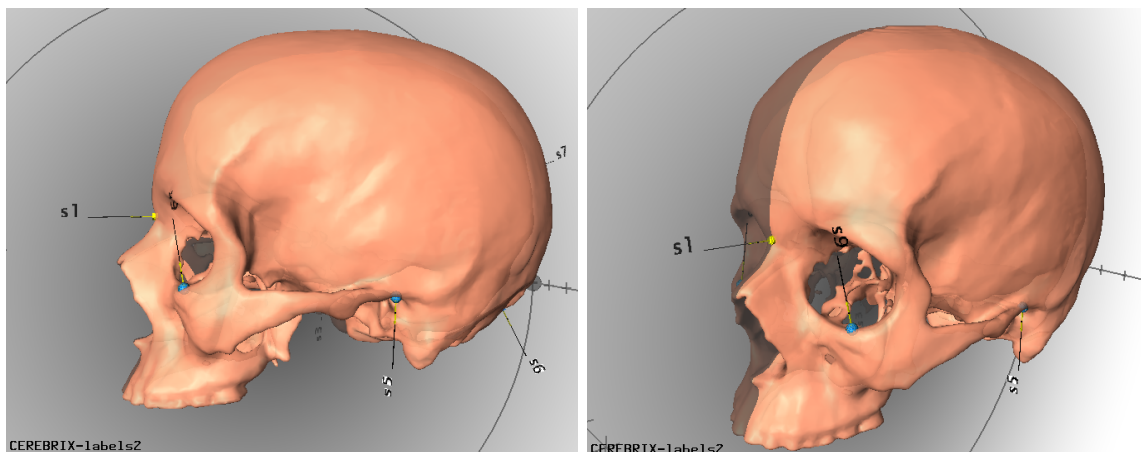
2 Nasion Nasion leží ve středu švu spojujícího čelní a nosní kost. Jde o průsečík frontonasální sutury s mediánní rovinou. Vzhledem ke skutečnosti, že lebky v trénovací sadě dosahují nižší úrovně detailu, na které již nemusí být frontonasální šev vždy viditelný, je nutné tento bod definovat i druhým způsobem – čistě z geometrického pohledu. Nasion bude pro potřeby navrhované metody definován jako bod na mediánní rovině, který leží nejvíce posteriorně v místě, kde je možné předpokládat spojení nosní a čelní kosti. Pozice bodu je ilustrována na obrázku 5.6.

4, 6 Porion (sin, dx) Pravý a levý porion jsou párové body ležící v nejlaterálnější části horního okraje vnějšího zvukovodu. Umístění je ilustrováno na obrázku 5.8.

5 Basion Basion je bod ležící uprostřed předního okraje velkého týlního otvoru v mediánní rovině, přímo naproti bodu jménem opisthion. Ve vzácných případech může být určení polohy basionu ztíženo zesílením předního okraje týlního otvoru. Poloha landmarku je na obrázku 5.7.

7 Inion Inion je nejvíce vyčnívající bod v zadní části lebky ležící na průsečíku pravé a levé superiorní nuchální linie. Je umístěný na bázi zevního týlního výběžku, viz. obr. 5.7.

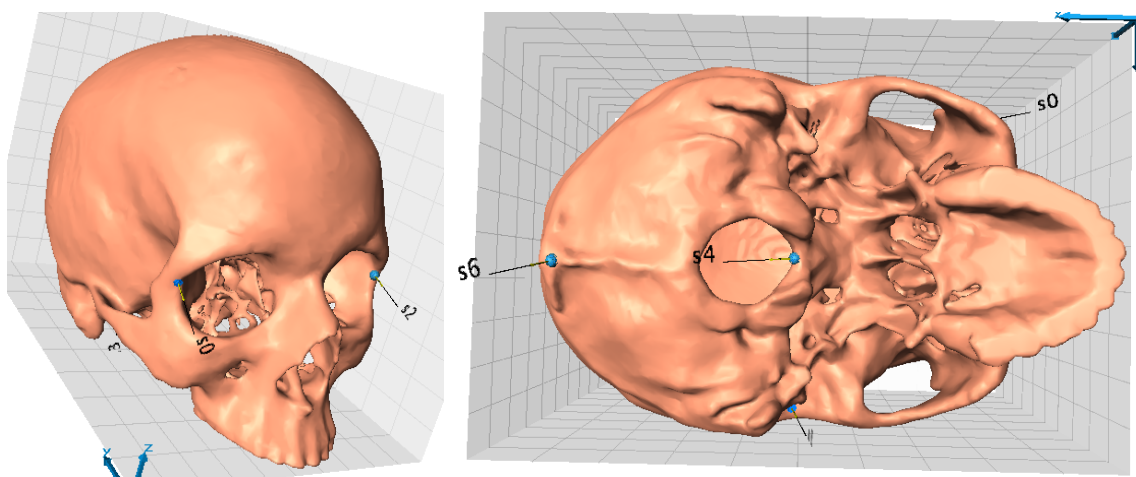
8 Lambda Bod ležící v místě, kde se spojuje šípový a lambdový šev, obrázek 5.8.



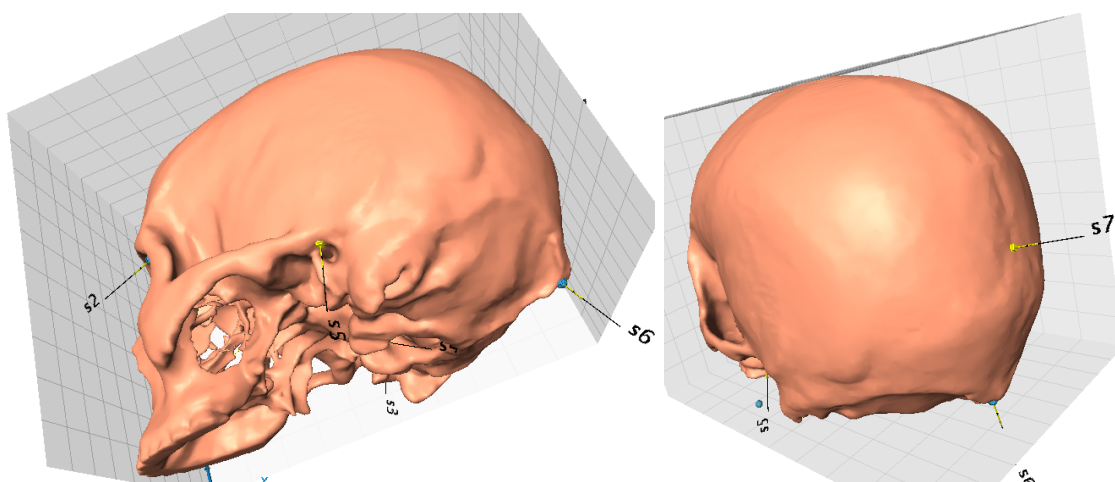
Obrázek 5.6: Ukázka polohy nasionu na referenční lebce. Nasion je žlutě zvýrazněný bod s číslem s1. Šedým stínem je vyznačena mediánní/midsagitální rovina lebky.

5.3 Oříznutí lebek v trénovací sadě

Prvním krokem automatické části je oříznutí lebek. Z lebek je odstraněna obličejová část a ponechána je většina lební klenby. Cílem oříznutí je v první řadě snížení výpočetní náročnosti. Oříznutím se velikost jedné lebky, určená počtem vrcholů její polygonální sítě, zmenší zhruba na polovinu. Druhým bodem, proč se oříznutí provádí, je zjednodušení objektů v trénovací sadě. Obličejová část by byla náročná na rekonstrukci, zároveň obličej není



Obrázek 5.7: Na obrázku vlevo je ukázka bodů frontomale anterior, jde o modré body značené čísly s0 a s2. Vpravo jsou ilustrovány pozice bodů inion (s6) a basion (s4).



Obrázek 5.8: Na obrázku vlevo je ukázka polohy levého porionu, jde o bod zvýrazněný žlutou barvou a popiskem s5. Na obrázku vpravo je vidět poloha landmarku lambda, označen popiskem s7.

středem zájmu rekonstrukce. Čím méně nepotřebných částí na rekonstruovaných modelech je, tím lze více předpokládat, že nebudou vnášet chybu do rekonstrukce ostatních částí. Zmíněná chyba může být vnesena např. chybnou registrací složitých útvarů atd.

Oříznutí je provedeno tím způsobem, že se lebka rozdělí rovinou proloženou třemi kraniometrickými body. Konkrétně jde o nasion a pravý a levý porion. Veškeré hrany a k nim přiléhající vrcholy, které leží celé pod touto rovinou, resp. leží kaudálním směrem od této roviny, jsou z modelu odstraněny. Jak vypadá lebka po oříznutí je patrné např. na obrázku 5.15.

5.4 Zrcadlení trénovací sady

Po vyznačení bodů, ještě před zarovnáním souboru lebek pomocí zobecněné prokrústovské analýzy, je velikost trénovací sady zdvojnásobena zrcadlením původních vzorků. V trénovací sadě se počítá zejména s modely, které obsahují zranění na laterálních částech lebky. Prvním důvodem zrcadlení je dosažení shodného počtu lebek poraněných na pravé a levé straně. Předpokládá se, že pokud by převládaly lebky poraněné pouze na jedné straně, pak by byly výsledky rekonstrukce zatíženy nízkým počtem dat v místech těchto zranění. V extrémním případě, pokud by všechny lebky obsahovaly trauma na stejné straně, mohla by data pro rekonstrukci určitého místa chybět úplně. Tento problém by sice bylo možné vyřešit i prostým výběrem konkrétních kusů do trénovací sady podle umístění zranění, avšak existují i předpoklady, že větší trénovací sada bude mít za následek lepší výsledky rekonstrukce a že se zrcadlením lebek v trénovací sadě při rekonstrukci zčásti využije symetrie lebek.

Zrcadlení lebek je řešeno změnou znaménka z souřadnice každého vrcholu polygonální sítě, lebky jsou zrcadleny podle osy z . Změnou znaménka se ale změní i orientace normálových vektorů všech polygonů, z back-facing trojúhelníků se stanou front-facing trojúhelníky a *vice versa*. Proto je nutné zároveň změnit pořadí vrcholů v trojúhelnících, například u všech polygonů zaměnit souřadnice druhého a třetího vrcholu, čímž se orientace normálových vektorů dostane do původního stavu. Následně musejí být zrcadleny i vyznačené landmarky, čehož se dosáhne stejným způsobem jako při zrcadlení vrcholů. Na závěr se navzájem vymění souřadnice bilaterálních landmarků, konkrétně porionů a bodů frontomale anterior.

5.5 Projekce pseudolandmarků

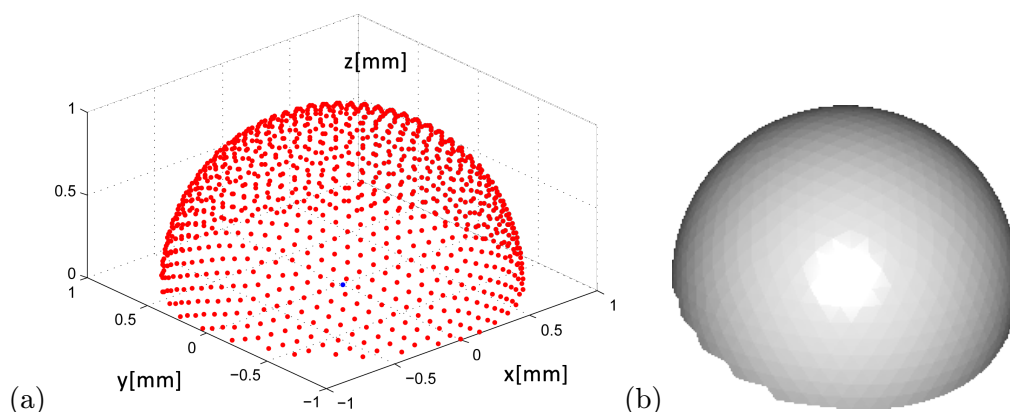
Zarovnání modelů bylo již popsáno v rámci předchozí podkapitoly. Ručně vyznačených 8 landmarků postačuje na dobré zarovnání všech modelů, zdaleka však nedostačuje pro popis tvaru povrchu lebky a jeho další rekonstrukci. Vzhledem k tomu, že v oblasti kalvy, na kterou se rekonstrukce zaměřuje především, je příliš malé množství vyznačitelných landmarků, které navíc většinou nelze identifikovat kvůli přílišnému vyhlazení lebky. Je nutné na lebkách automaticky vygenerovat sadu pseudolandmarků. Počet bodů v nově generované sadě je zvolen na celkem 1758 pseudolandmarků. Sada je rozdělena na dvě poloviny, první polovina popisuje vnější a druhá polovina nitřní povrch lebky. Takto velká sada je již schopna, při správném rozdělení pseudolandmarků po lebce, popsat její povrch poměrně dostatečně.

Pro generování pseudolandmarků je využito podobnosti lební klenby s hemisférou. Nejprve dojde k vygenerování bodů na polokouli. Body jsou na polokouli generovány s rovnoměrným rozložením, jak je ilustrováno na obrázku 5.9.

Po vygenerování bodů je polokoule zarovnána ke konsensu lebek. Pro připomenutí – konsensus je průměrný tvar vypočítaný z celé sady zarovnaných vzorků. Polokoule je zarovnána na rovinu definovanou pomocí landmarků nasion a obou porionů. Střed polokoule leží v těžišti těchto tří landmarků. Po zarovnání jsou body, včetně středu polokoule, posunuty mírně vzad od basionu dorzálním směrem a mírně vzhůru kraniálním směrem, aby se optimalizovalo budoucí rozložení pseudolandmarků na lebkách.

Následuje samotná projekce pseudolandmarků. Projekce bodů z polokoule na povrch lebky probíhá ve třech krocích:

1. Vypočítá se sada vektorů pro projekci vygenerovaných pseudolandmarků. Vektory



Obrázek 5.9: Rozložení pseudolandmarků na hemisféře. Na grafu vlevo (a) jsou vidět samotné body. Mezi sousedními vrcholy polokoule je vždy stejná vzdálenost. Modře je vyznačen střed polokoule, ležící v počátku soustavy souřadnic. Vpravo (b) je zobrazeno propojení jednotlivých vrcholů do polygonálního modelu.

v sadě mají všechny shodný výchozí bod, kterým je střed koule, zarovnaný na průměrný tvar. Jako cílové body vektorů jsou použity pseudolandmarky vygenerované na povrchu polokoule také zarovnané na průměrný tvar. Sada obsahuje celkem 879 vektorů.

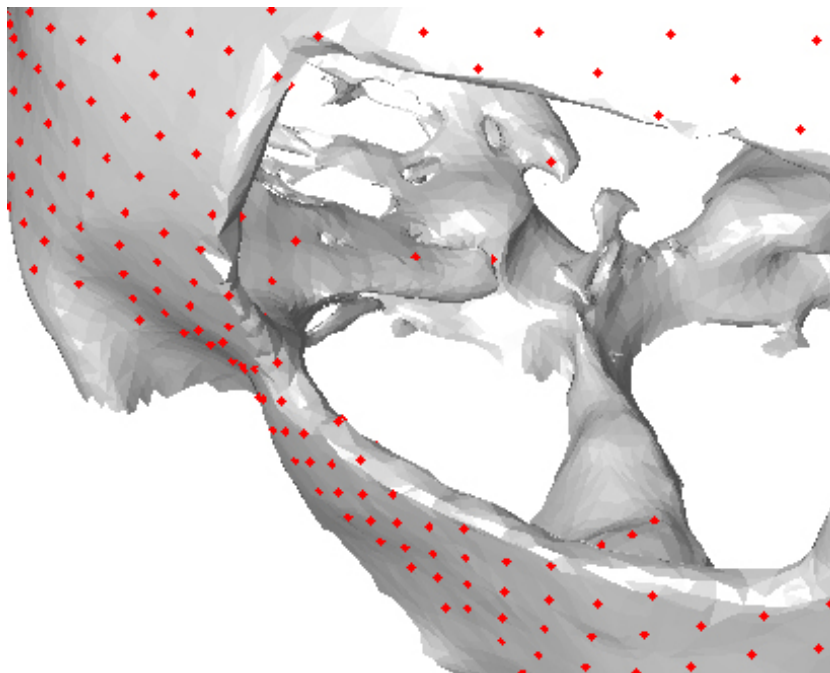
2. Vypočítá se průsečík každého vektoru v sadě s každým trojúhelníkem konkrétního polygonálního modelu. Vektor může lebku protnout hned několikrát, může mít průsečík s více než jedním trojúhelníkem. K tomu dochází zejména v místech, kde lebka obsahuje složitější útvary, jako jsou například horní nosní dutiny, očníkové kosti apod. Proto se jako průmět bodu na povrch lebky bere vždy takový průsečík, který je nejvzdálenější směrem od počátku vektoru. Existuje i druhá možnost, že průsečík nebude nalezen žádný. Zmíněný případ nastane zřejmě ve chvíli, kdy vektor směřuje do místa, kde je lebka traumatizovaná, jinak řečeno, kde povrch lebky vlivem zranění chybí. Chybějící body se stanou předmětem další rekonstrukce.
3. Protože se modeluje vnější i vnitřní povrch lebky, tak se předchozí krok provede s mírnou úpravou dvakrát. V prvním případě se berou v potaz pouze ty trojúhelníky, jejichž normály nesvírají s konkrétním vektorem úhel větší než 90 stupňů. To znamená, že při hledání průsečíků se z modelu vynechávají „frontfacing“ polygony. Výsledkem jsou body projektované na vnější povrch lebky.

V druhém případě se postupuje velmi podobně, změna je v tom, že se naopak vynechají veškeré polygony, které jsou „backfacing“. Výsledkem jsou tak body projektované na vnitřní povrch lební klenby.

5.6 Odstranění chybně projektovaných pseudolandmarků

Ne všechny pseudolandmarky jsou projektovány do správných míst. Může docházet například k tomu, že jsou body projektovány do hrany zranění, kde jejich umístění není žádoucí. V dalším případě se pseudolandmarky mohou projektovat do vnitřních útrob lebky, kterými vektory někdy procházejí. Díky tomu, že část lebky díky traumatu chybí, jsou průsečíky s vnitřními útroby nejvzdálenější od počátku vektoru, kvůli čemuž jsou body takto

chybně projektovány. Oba typy chybně projektovaných bodů jsou na obrázku 5.10.



Obrázek 5.10: Výřez lebky, na kterém jsou vidět chybně registrované pseudolandmarky. Nacházejí se jednak uvnitř lebky, umístěné na její bázi, a také na hraně zranění, což je patrné v levém dolním rohu traumatu.

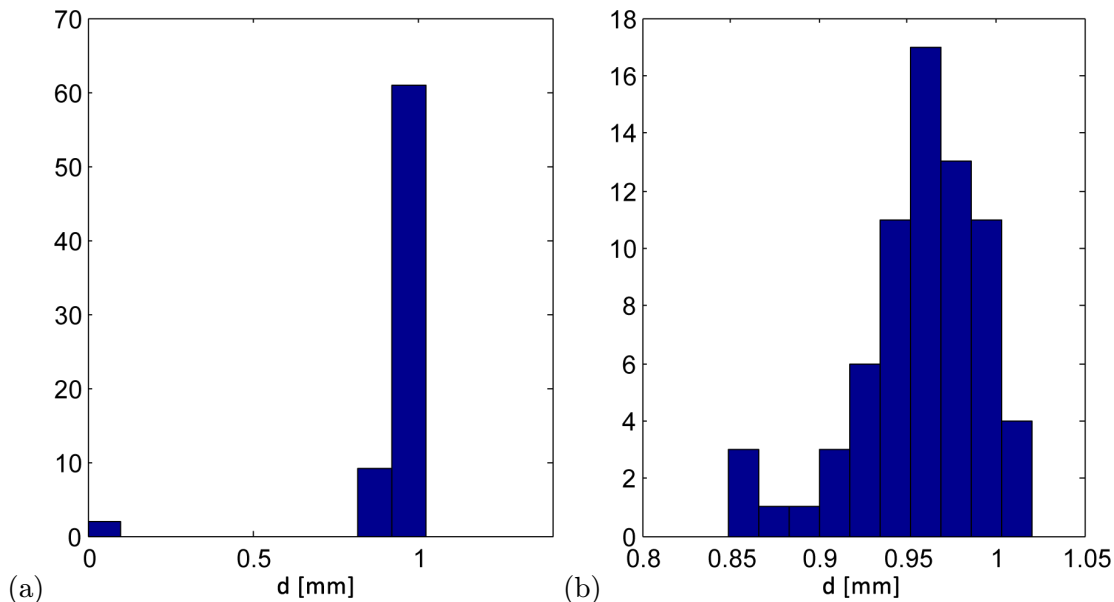
Chybně projektované body je přirozeně vhodné identifikovat a odstranit. Každý z obou typů chybné projekce je identifikován odlišným způsobem. Pro chyby prvního typu lze využít shlukovací metodu DBSCAN, pro druhý typ je využita znalost propojení pseudolandmarků pomocí polygonální sítě.

Odstranění pseudolandmarků chybně umístěných na bázi lebky

Shlukovací metoda se používá vždy na skupinu různých umístění jednoho konkrétního pseudolandmarku. Do shlukovací metody vstupuje skupina bodů, které značí umístění jednoho konkrétního pseudolandmarku na všech lebkách ve zkoumané sadě. Odstranění chybných hodnot je založeno na předpokladu, že více než polovina bodů v každé skupině je projektována správně. Platnost tohoto předpokladu je zajištěna zrcadlením všech lebek v původní zkoumané sadě. Dále se předpokládá, že správně registrované pseudolandmarky budou tvořit shluk s relativně malým rozptylem hodnot. Pomocí shlukovací metody DBSCAN je pak tento shluk identifikován a zbývající rozptýlené body jsou označeny za odlehlé hodnoty. Metoda DBSCAN je aplikována na všechny pseudolandmarky se stejnými parametry (průměr ϵ -okolí a počet bodů MinPts). Metoda počítá s tím, že průměry shluků správně projektovaných pseudolandmarků budou přibližně stejné.

Při shlukovací analýze i při následující rekonstrukci chybějících a odstraněných bodů se pracuje pouze se vzdáleností pseudolandmarků od počátku, nebo-li velikostí projekčních vektorů, protože směry vektorů jsou pro všechny body v daných shlucích shodné. Díky tomu je redukován objem dat pro shlukovací analýzu i rekonstrukci pomocí pravdě-

podobnostní analýzy hlavních komponent, protože se trojnásobně snižuje dimenzionalita problému. Místo 3 souřadnic bodu v prostoru se počítá pouze s 1 vzdáleností od středu hemisféry. Na histogramech 5.11 jsou vidět rozložení vzdáleností vybraných pseudolandmarků.



Obrázek 5.11: Rozložení vzdáleností dvou pseudolandmarků od středu hemisféry. (a) Skupina bodů obsahující odlehlé hodnoty, (b) skupina bodů bez odlehlých hodnot.

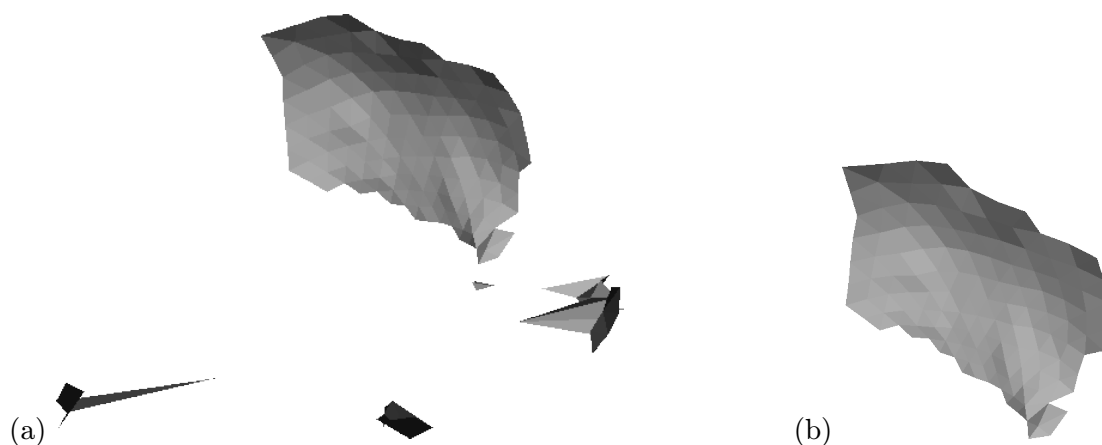
Odstranění pseudolandmarků z hrany zranění

Pro odstranění bodů registrovaných na hranu zranění se využije skutečnosti, že v polygonální síti tyto body většinou bezprostředně sousedí s pseudolandmarky, které nebyly kvůli zranění umístěny vůbec, popřípadě byly odstraněny výše popsanou shlukovací metodou. Odstraní se všechny body, které bezprostředně sousedí s již chybějícím bodem. Tento postup však může vést kromě odstranění všech chybných bodů i k odstranění velkého množství správně umístěných pseudolandmarků. Rekonstrukce probíhá tím způsobem, že nejdříve jsou odhadnuty pseudolandmarky odstraněné shlukovací metodou a body na hranách zranění jsou ponechány. Potom jsou odstraněny body ležící pouze na hranách zranění a následně jsou dodatečně odhadnuty.

5.7 Rekonstrukce povrchu na základě pseudolandmarků

V tuto chvíli je možné oba rekonstruované povrchy exportovat jako polygonální modely. Konektivita jednotlivých pseudolandmarků je převzata z modelu použité hemisféry. Užitečné je zejména exportovat pouze ty části, kde byly doplňovány nějaké chybějící body, místo celé hemisféry projektované na lebku. Tento krok lze provést přímočaře, když je uchována maska bodů, které na lebce chyběly, nebo byly některou z metod identifikovány jako špatně promítnuté a následně odstraněny. Potom lze exportovat pouze takové polygony, které mají některý ze svých vrcholů označený v masce za chybějící a následně odhadnutý. Lze však

předpokládat, že projekce a odstraňování pseudolandmarků nebudou pracovat naprosto bezchybně, což bude mít za následek rekonstrukci i dalších bodů různě po lebce, které nemají s původním zraněním nic společného a v exportu jsou pouze jako rušivé elementy. Zároveň je možné předpokládat, že většina rušivých elementů nebude s plochou kryjící původní zranění nijak propojena a také že metody budou natolik úspěšné, aby největší plochu zabíraly cílené požadované povrchy ležící přes rekonstruované zranění. Při splnění výše uvedených předpokladů jsou rušivé elementy odstraněny s pomocí teorie grafů. Na polygonální síť lze pohlížet jako na graf, vrcholy a hrany polygonální sítě jsou identické s vrcholy a hranami neorientovaného grafu. Informace o polygonech sítě je možné při tomto konkrétním převodu zanedbat. Pomocí grafových algoritmů je možné určit počet komponent grafu, příslušnost vrcholů k jednotlivým komponentám a velikost (z hlediska počtu vrcholů) jednotlivých komponent. Při splnění výše uvedených předpokladů je pak největší komponenta grafu zároveň největší souvislou rekonstruovanou plochou, které překrývá zranění. Rušivé elementy lze z výsledku odstranit, protože jejich vrcholy budou patřit k jiným komponentám. Na obrázku 5.12 je zobrazen vnitřní povrch lebky před a po odstranění artefaktů.

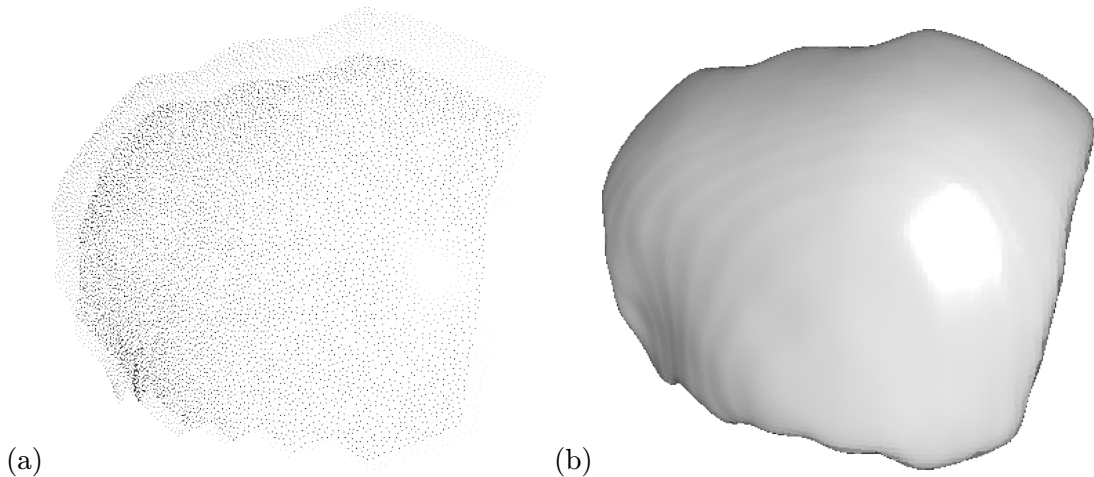


Obrázek 5.12: Rekonstruovaná část vnitřního povrchu lebky. Polygonální síť vlevo (a) obsahuje pouze ty vrcholy, které byly během rekonstrukce odhadnuty, popř. odstraněny a znovu odhadnuty. Konektivita sítě byla převzata z modelu hemisféry, jehož vrcholy byly jako pseudolandmarky projektovány na každou lebku v trénovací sadě. Obrázek vpravo obsahuje pouze největší komponentu grafu definovaného konektivitou sítě, ostatní vrcholy byly odstraněny.

Exportované povrchy je možné použít pro vymodelování hrubé předlohy protézy. Hrubá předloha se vymodeluje navzorkováním exportovaných částí hemisféry, plochy lze navzorkovat použitím Poissonova vzorkování s vhodně zvoleným cílovým počtem bodů. Následně se provede Poissonova rekonstrukce povrchu. Postup rekonstrukce je ilustrován na obrázku 5.13.

5.8 Registrace referenční lebky na ostatní modely v sadě

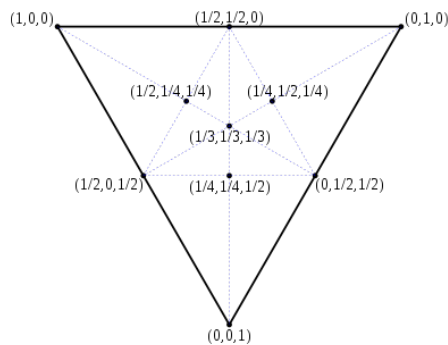
Pro sestavení statistického modelu založeného nejen na pseudolandmarcích, ale na kompletních polygonálních modelech, je potřeba mít k dispozici model celistvé nepoškozené lebky. Tento model bude registrován na všechny zbývající modely ve zkoumané datové sadě. Statistický model se pak sestaví prakticky z vrcholů referenčního polygonálního modelu, který



Obrázek 5.13: Na prvním obrázku zleva (a) jsou navzorkované obě dvě plochy rekonstruované části lební klenby. Druhý obrázek (b) ukazuje rekonstruovaný povrch – předlohu pro vytvoření implantátu.

bude registrován na veškeré zbývající lebky. Díky tomu se zajistí stejný počet vrcholů na jednotlivých modelech a zároveň vzájemná korespondence vrcholů mezi jednotlivými modely.

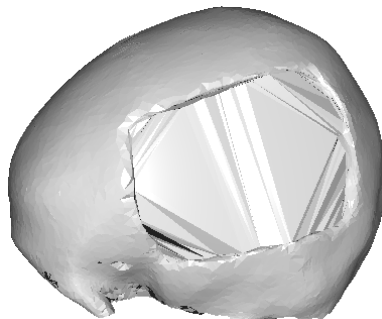
Registrace referenčního modelu k ostatním lebkám probíhá s využitím thin-plate spline warpingu a pseudolandmarků získaných v předchozích krocích. Referenční lebka je vždy deformována na cílovou lebku, na kterou se má registrovat. Pro řízení warpingu jsou použity pseudolandmarky na referenční a zraněné lebce. Jde o přesnou aproximaci, což znamená, že landmarky na referenční lebce jsou deformovány naprosto přesně do pozic pseudolandmarků na cílové lebce. Každý trojúhelník cílové lebky je navzorkován stejným počtem bodů s využitím barycentrických souřadnic. Rozložení vzorků v trojúhelníku je ilustrováno na obrázku 5.14.



Obrázek 5.14: Vzorkování trojúhelníků polygonálního modelu na základě daných barycentrických souřadnic. Obrázek převzat z [26].

Následuje vyhledání nejbližších bodů navzorkované lebky k vrcholům deformované referenční lebky. K vyhledání bodů je využitý indexovací algoritmus KD-tree [16]. Tím je registrace dokončena. Po registraci na žádné lebce nechybí žádné body. Místo toho jsou

v oblasti zranění registrovány do špatných míst, přesněji řečeno k okrajům zranění. Zranění ovlivní registraci pouze lokálně, což jinými slovy znamená, že chybně jsou registrovány pouze body v místě zranění. Vrcholy ležící mimo zranění zůstanou neovlivněné. Situace je ilustrována obrázkem 5.15.



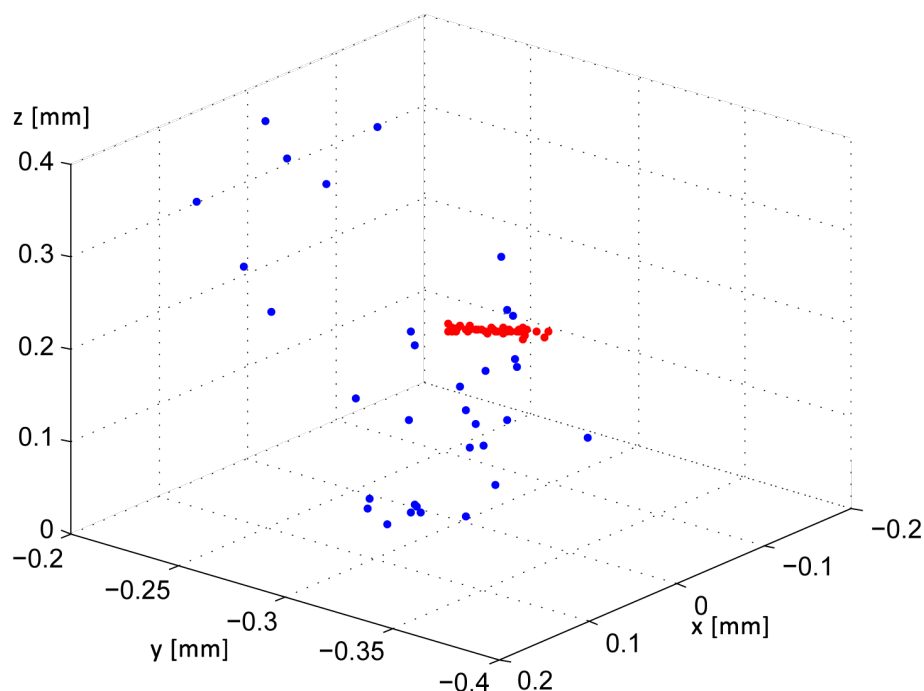
Obrázek 5.15: Referenční lebka registrovaná na poraněnou lebku. Body na referenční lebce, které ležely nad místem zranění, jsou nyní chybně registrovány k okrajům zranění.

K identifikaci chybných vrcholů se opět využije shlukovací metoda DBSCAN. Vychází se z předpokladu, že každý konkrétní vrchol bude správně registrován alespoň na polovině lebek v zrcadlené datové sadě. Rozdíl je však v tom, že oproti užití u pseudolandmarků se nebudou analyzovat shluky na základě vzdálenosti, ale použijí se přímo souřadnice jednotlivých vrcholů. Shluky se tak vytvářejí ve 3D prostoru. Situace je ilustrována na obrázku 5.16, na kterém je zachycen jak shluk korektních hodnot, tak pozice odlehlých vrcholů. Obrázek zachycuje polohy jednoho zvoleného vrcholu na všech modelech v trénovací sadě. Korektní hodnoty jsou vyznačeny červenou barvou. Lze pozorovat, že správně umístěné vrcholy tvoří přibližně lineární shluk. To je důsledek TPS warpingu řízeného projektovanými pseudolandmarky, resp. samotným způsobem projekce pseudolandmarků.

Odstranění hrany zranění

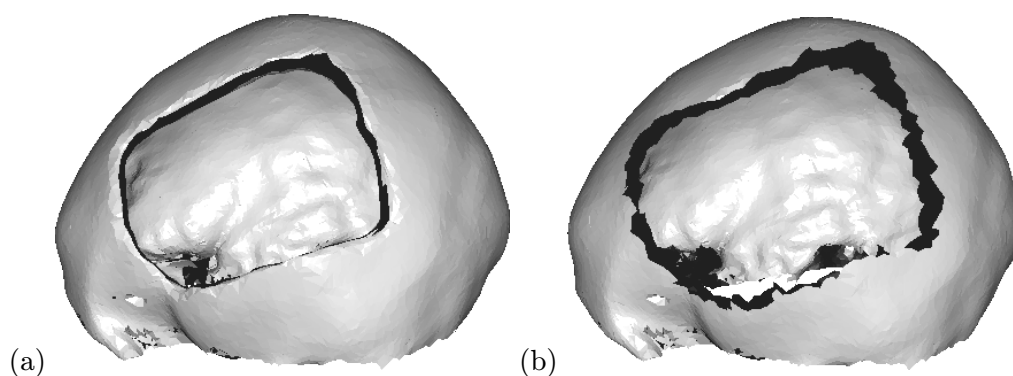
Odstranění odlehlých vrcholů shlukovací metodou však není zcela dostačující, zejména kvůli nižší citlivosti na špatné body, které leží příliš blízko shluku korektních hodnot. Předpokládá se sice, že shluky budou mít přibližně stejný průměr, nedá se ale předpokládat, že by tento průměr byl zcela shodný. Proto nelze nastavit přísnější parametry shlukovací metody, protože by bylo odstraněno i velké množství správně umístěných bodů. Je proto lepší neodstraňovat veškeré chybně registrované body a postup raději doplnit o další metodu, která odstraní i body blízko okrajů zranění. Využita je opět znalost propojení jednotlivých vrcholů polygonální sítě. Stejně jako v případě pseudolandmarků se odstraní i vrcholy bezprostředně sousedící s body vyřazenými během předchozího postupu. Tento krok je nutné zopakovat n -krát, aby se zvýšila jeho účinnost. Z odbornějšího úhlu pohledu lze toto šíření chybějících hodnot polygonálním modelem definovat jako grafovou operaci.

Polygonální model se převede dříve uvedeným způsobem na neorientovaný graf $G = (V, H)$. Dále se zavede funkce F , která každému vrcholu grafu přiřazuje prostorové souřadnice, formálně zapsáno $F : V \rightarrow R^3 \cup (r, r, r)$. Uspořádaná trojice (r, r, r) značí, že souřadnice vrcholu nejsou známy, vrchol byl z modelu odstraněn a je označován jako chybějící. Z hlediska samotného grafu, zachycujícího pouze topologii polygonálního modelu, tyto vrcholy ovšem nechybí, pouze nejsou známy jejich prostorové souřadnice. Zavede se



Obrázek 5.16: Polohy jednoho konkrétního vrcholu na různých lebkách v trénovací sadě. Modře jsou označeny odlehlé hodnoty, červeně shluk korektních hodnot. V grafu je zobrazeno celkem 86 bodů, z nich je 34 odlehlých a 52 tvořících červeně vyznačený shluk.

množina N , která je podmnožinou vrcholů získaného grafu, $N \subset V$, a obsahuje vrcholy, které jsou označeny jako chybějící. Následně se do množiny N přidají všechny vrcholy z V , pro které platí, že do nich vede cesta z libovolného vrcholu patřícího do N a délka této cesty je maximálně n .



Obrázek 5.17: Na obrázku vlevo (a) je ilustrováno odstranění chybně registrovaných vrcholů pomocí metody DBSCAN. Stále jsou patrné okraje zranění, tvořené polygony, které jsou mírně natočené směrem dovnitř lebky. Obrázek vpravo (b) ukazuje druhou část odstranění chybných vrcholů pomocí výše uvedené grafové operace. Odstraněny byly sousedící vrcholy, k nimž z vyražených bodů vedla cesta o maximální délce 3 hrany.

5.9 Rekonstrukce bodů pomocí PPCA

Následně jsou souřadnice všech vrcholů rekonstruovány pomocí metody PPCA. Každá lebka je převedena na vektor o počtu $3n$ dimenzí, který obsahuje souřadnice všech jeho vrcholů, n značí počet vrcholů. Pro připomenutí – všechny modely mají po kroku s registrací stejnou topologii polygonální sítě a také stejný počet vrcholů. Díky tomu mají i samotné vektory shodný počet dimenzí. Vstupem pro metodu PPCA je matice obsahující vektory všech lebek v rekonstruované sadě a počet hlavních komponent, nebo-li počet dimenzí prostoru, do kterého se má zadaná matice transformovat. Podobu vstupní matice přibližuje tabulka 5.9. Výstupem PPCA je průměrná lebka, transformační matice a jednotlivé lebky převedené do zredukovaného podprostoru. Výstupy metody již neobsahují žádné chybějící hodnoty, s jejich pomocí lze již triviálně dopočítat pravděpodobnou podobu poraněné lebky před úrazem.

	Vrchol č.1			Vrchol č. 2			...
	x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2	
Lebka 1	0,12	0,01	-0,2	NaN	NaN	NaN	
Lebka 2	0,10	0,02	-0,1	NaN	NaN	NaN	
Lebka 3	0,11	0,00	-0,15	0,23	0,22	0,1	
Lebka 4	NaN	NaN	NaN	0,27	0,25	0,2	
⋮							

Tabulka 5.2: Polygonální modely ve formátu v jakém vstupují do metody PPCA. Zkratka NaN značí chybějící hodnoty.

Jak je vidět podle výsledků na obrázku 7.17a, při rekonstrukci může vzniknout hrana v místech, kde odhadnutá plocha navazuje na zbytek lebky. Hranu je možné vyhladit pomocí nulování zvoleného počtu posledních komponent. Hlavní komponenty jsou seřazeny podle množství variability, které popisují. První komponenty budou modelovat např. šířku a délku lebky, další její asymetrii. Zbývající hlavní komponenty budou modelovat méně významné detaily, které mohou být specifické pro jednotlivé lebky v sadě. Předpokládá se, že jedním z takových detailů jsou právě vzniklé hrany, které lze vynulováním určitých komponent odstranit.

5.10 Korekce velikosti rekonstruovaných modelů

Jak bylo uvedeno v části 5.2, díky zobecněné prokrústovské analýze jsou všechny modely ve zkoumané sadě značně zmenšené. Posledním krokem metody, po odhadnutí chybějících bodů, je zvětšení modelů na původní velikost a zarovnání do původní polohy. Za tímto účelem je nutné, aby zůstaly uchovány i původní pozice vyznačených landmarků. Potom je možné každý rekonstruovaný model jednoduše zarovnat zpět do původní pozice.

5.11 Testování věrohodnosti rekonstrukce

Do návrhu metody je zařazen i návrh jejího testování. Testování metody spočívá v ověření, do jaké míry se tvar zrekonstruované lebky liší od jejího původního tvaru, dokud ještě

nebyla poškozena zraněním. K testování je potřeba další sada lebek, tentokrát kompletních. Na těchto lebkách jsou virtuálně vytvořena zranění způsobem, aby se svou podobou co nejvíce blížila zraněním reálným. Virtuálně poraněná lebka je po zrekonstruování srovnána se svojí původní podobou. Srovnání probíhá na základě Hausdorffovy vzdálenosti mezi oběma polygonálními modely. Výsledek lze dobře prezentovat pomocí rozdílného zabarvení povrchu zrekonstruované lebky v závislosti na tom, jak se v konkrétních místech od původní lebky liší.

Kapitola 6

Realizace

Tato kapitola se zabývá praktickou realizací metody navržené v předcházející části, zejména zajištěním datových sad, softwarových prostředků a implementací.

6.1 Datové sady

Pro potřeby metody bylo nutné zajistit sadu poraněných lebek, kromě nich však také alespoň jednu lebku kompletní a nepoškozenou, která by se dala použít jako referenční pro sestavení statistického modelu. Dále bylo nutné zajistit několik nepoškozených lebek za účelem testování.

Poraněné lebky

Sadu poraněných lebek poskytla firma 3Dim laboratory s.r.o. Poskytnutá sada obsahuje čtyřicet vysegmentovaných polygonálních modelů. Modely byly dodány ve formátu STL, obsahují v průměru 100 tisíc polygonů s drobnými odchylkami. Na tento počet polygonů byly následně standardizovány i další získané lebky. Převážná většina lebek v této sadě obsahuje laterální zranění, zhruba čtyři modely jsou poškozené ve frontální části. Lebky jsou zachycené včetně obličeje, neobsahují však dolní čelist.

Referenční lebka

Kompletní model referenční lebky byl získán z ukázkové sady DICOM souborů, dostupné na webu společnosti OsiriX [30]. Z volumetrických dat bylo nutné vysegmentovat polygonální model, k čemuž byl využit program Amira 4.5.3 [25]. Z lebky nebyla vysegmentována spodní čelist, dále byly zanedbány horní nosní dutiny kvůli své složitosti. Ze stejného důvodu se dutiny nemodelují ani v reálně vytvářených implantátech, což není problém ani ze zdravotního hlediska¹. Po vysegmentování byl ještě upraven počet polygonů, aby model svojí kvalitou odpovídal modelům v rekonstruované sadě. Model získaný přímo z programu Amira obsahoval několikanásobně vyšší množství polygonů, než bylo potřeba, proto bylo nutné provést decimaci jeho polygonální sítě. K této úpravě byl použit open source program MeshLab [38]. Jako vhodná metoda se ukázala být metoda nazvaná Quadric Edge Collapse Decimation.

¹Jednou z výraznějších změn, které pacient pocítí, když přijde o horní nosní dutiny, je změna jeho hlasu. Změna je dána skutečností, že zvuk lidského hlasu se mimo jiné dotváří i v dutinách lebky.

Lebky určené pro testování

Jako lebky pro testování byly získány CT skeny z projektu Visible Human Project [42]. Data byla opět ve formátu DICOM, polygonální modely byly vysegmentovány stejným způsobem jako refereční lebka, s výjimkou dutin, které již pro účely testování nebylo nutné odstraňovat. Dále byly získány lebky z Ústavu antropologie PřF MU. Na všech těchto lebkách byla virtuálně vytvořena zranění pomocí programů MeshLab a GOM Inspect [32]. Aplikace MeshLab byla použita pro odstranění požadovaných vrcholů a polygonů modelu, GOM Inspect byl využit pro spojení vnitřního a vnějšího povrchu lebky a vytvoření hrany zranění, díky čemuž byla po odstranění části polygonů opět obnovena „vodotěsnost“ upravovaného modelu.

6.2 Anotace polygonálních modelů

Na anotaci lebek pomocí landmarků byl využit program Landmark editor [31]. Jde o program, který byl původně navržen pro účely zkoumání změn tvaru lebek primátů během evoluce. Díky tomu je přizpůsoben přímo pro anotování lebek pomocí landmarků. Do programu se importují modely ve formátu PLY (je tedy nutná konverze z STL formátu, kterou lze řešit např. pomocí programu MeshLab). Na všech lebkách je bezpodmínečně nutné vyznačit sadu ve stejném pořadí. Pořadí musí odpovídat číslům landmarků uvedených v návrhu metody. Po dokončení anotace je možné všechny landmarky hromadně exportovat. Aplikace využívá pro export landmarků vlastní jednoduchý formát nazvaný PTS.

6.3 Implementace

Automatická část rekonstrukce je řešena pomocí aplikace vytvořené v prostředí Matlab [35]. Aplikace má textové rozhraní, grafické prostředí není z hlediska účelu potřeba. Vstupem aplikace je sada souborů obsahující polygonální modely ve formátu STL a k nim příslušné soubory s pozicemi landmarků ve formátu PTS. Výstupem aplikace jsou modely rekonstruovaných lebek a modely odhadnutých vnitřních a vnějších povrchů lebek v místech zranění.

Rozhraní aplikace

Kořenová složka aplikace má následující obsah:

- adresář **lib**, který obsahuje podpůrné skripty a také nástroje třetích stran,
- adresář **tmp** obsahující dočasné soubory polygonálních modelů používané během rekonstrukce,
- adresář **models** s modely poškozených lebek a pozicemi landmarků,
- adresář **outs** obsahující výsledky rekonstrukce, jak rekonstruované lebky, tak vnitřní a vnější odhadnuté povrchy,
- skript **demo.m** sloužící jako ukázka pro spuštění aplikace,
- skripty **SkullSet.m** a **Skull.m**, které tvoří páteř celé aplikace.

Z uživatelského pohledu jsou nejdůležitější složky **models** a **outs**. Je nutné, aby obsah složky **models** bezpodmínečně dodržoval definovanou strukturu. Složka musí obsahovat pouze podsložky pojmenované čísly od 1 do n , kde n značí počet modelů v sadě. Posloupnost číslování podsložek musí být kompletní, nesmí být přerušena. Každá z podsložek musí obsahovat dva soubory, a to **model.stl** a **landmarks.pts**. V prvním souboru je uložen polygonální model lebky, ve druhém odpovídající exportované landmarky. Dále může být v podsložce libovolný počet dalších souborů, například textový soubor s označením případu, komentářem apod. Důležité je, aby první podsložka, pojmenovaná číslem 1, obsahovala model zdravé, nepoškozené, referenční lebky.

Složka **outs** obsahuje výsledky rekonstrukce. Modely rekonstruovaných lebek jsou označeny **2.stl**, **3.stl** ... **n .stl**, n je počet rekonstruovaných modelů. Rekonstruované vnitřní a vnější povrchy jsou exportovány jako soubory **2_in.stl**, **2_out.stl** ... **n _in.stl**, **n _out.stl**. Rekonstrukce první lebky se neprovádí, protože jde o referenční lebku.

Spuštění aplikace

Aplikace je implementována v objektovém stylu, tvořena je dvěma třídami **SkullSet** a **Skull**. Skript **demo.m** spouští ukázkou aplikace. Spuštění spočívá ve vytvoření instance třídy **SkullSet** a invokací metody **exec**:

```
>> app = SkullSet;  
>> app.exec;
```

Využití skriptů a toolboxů třetích stran

Při implementaci byla využita řada skriptů a nástrojů získaných zejména přes portál MATLAB Central File Exchange [36]. Mezi použité nástroje patří:

- toolbox **MatlabBGL** určený pro práci s grafy, v implementaci metody byl využitý pro odstranění artefaktů z exportovaných ploch,
- toolbox **PCAMV** poskytující implementace různých variant PCA pro práci se soubory dat obsahujícími chybějící hodnoty,
- skripty **stlread.m**, **patchslim.m** a **stlwrite.m** pro načtení, odstranění duplicitních vrcholů a uložení polygonálního modelu,
- skript **dbscan.m** poskytující implementaci shlukovací metody DBSCAN,
- soubor skriptů s názvem **Triangle/Ray Intersection** pro výpočet průsečíků vektoru a polygonálního modelu,
- soubor skriptů pod názvem **Uniform Sampling of a Sphere** pro generování rovnoměrného rozložení bodů na povrchu koule.

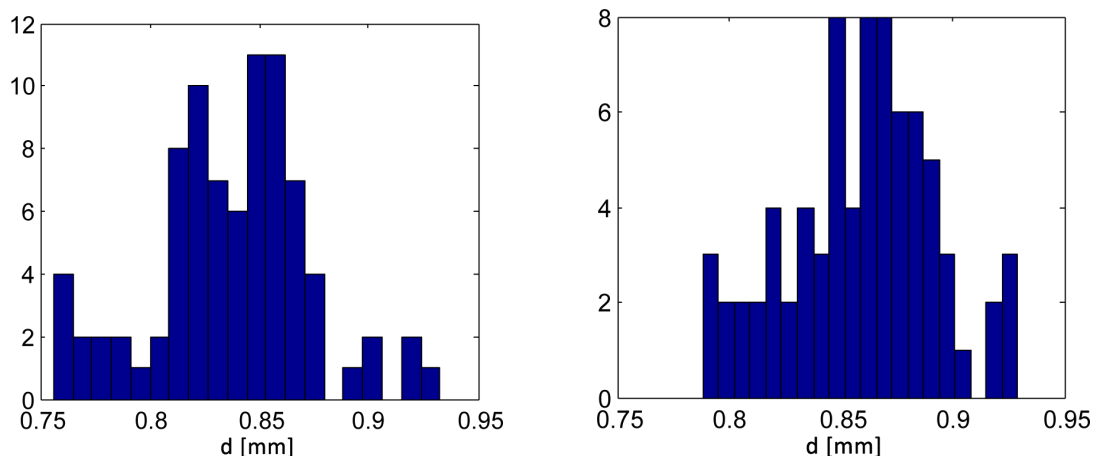
Kapitola 7

Výsledky

Tato kapitola popisuje výsledky experimentů týkajících se různých částí metody. Kromě věrohodnosti rekonstruovaných lebek jsou zde zkoumány zejména ideální hodnoty jednotlivých parametrů, které je nutné v navržené metodě nastavit. Mezi tyto parametry patří například počet hlavních komponent pro metodu PPCA, průměr ϵ -okolí a hodnota MinPts pro metodu DBSCAN apod.

7.1 Identifikace chybně projektovaných pseudolandmarků

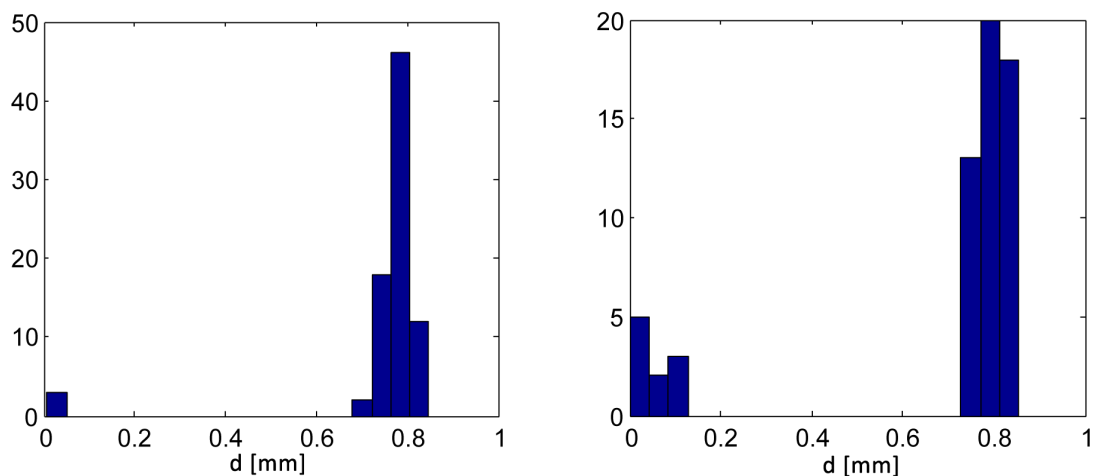
Prvními zkoumanými parametry jsou průměr ϵ -okolí a MinPts pro nastavení metody DBSCAN v kroku 5.6, pro identifikaci chybně projektovaných pseudolandmarků. Prvotní odhad parametrů byl učiněn podle náhodně vybraných vzorků, na základě kterých byl nastaven parametr ϵ . Na histogramech 7.1 jsou vidět velikosti náhodně zvolených shluků, u kterých se nevyskytovaly odlehle hodnoty. Ve zkoumané sadě bylo po zrcadlení celkem 86 modelů, na každý model bylo projektováno 1758 pseudolandmarků.



Obrázek 7.1: Histogramy vzdáleností dvou pseudolandmarků, které neobsahovaly odlehle hodnoty. Vlevo jsou vzdálenosti pseudolandmarku 650 od středu hemisféry, vpravo vzdálenosti pseudolandmarku 1550.

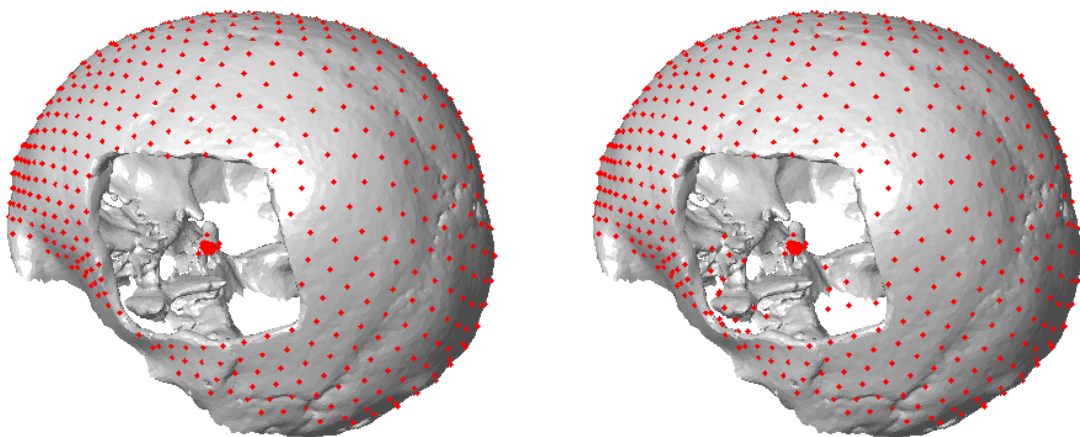
Na grafech 7.2 jsou vybrány dva pseudolandmarky, u kterých se vyskytují odlehle hodnoty. Vybrané příklady byly voleny tak, aby ležely napříč celou sadou 1758 pseudoland-

marků. Z uvedených histogramů lze pozorovat, že průměr shluku pravděpodobně nepřekročí hodnotu 0,2. Na tuto hodnotu byl nastaven parametr ϵ .



Obrázek 7.2: Histogramy pseudolandmarků s odhlednými hodnoty. Vlevo jsou vzdálenosti pseudolandmarku 40, vpravo vzdálenosti pseudolandmarku 300.

Hodnota parametru ϵ byla během pokusů dále snižována. Množství pseudolandmarků v ϵ -okolí, parametr MinPts, byl nastaven na $\frac{n}{2}$, kde n značí počet modelů v sadě, včetně zrcadlených modelů. Cílem bylo, aby byly odstraněny pokud možno všechny chybně registrované body a zároveň, aby celkově odstraněných bodů bylo co nejméně, protože s rostoucím počtem chybějících dat se snižuje kvalita rekonstrukce pomocí PPCA. Sledováno bylo procento chybějících dat (označováno jako parametr β), výskyt bodů registrovaných na vnitřních útvarech na bázi lebky a také výsledek rekonstrukce aplikované po odstranění odhledných hodnot. Na obrázku 7.3 jsou uvnitř lebky vidět chybně registrované pseudolandmarky, které nejsou v případě špatného nastavení metody DBSCAN odhaleny. Ukázán je také vliv na výslednou rekonstrukci.

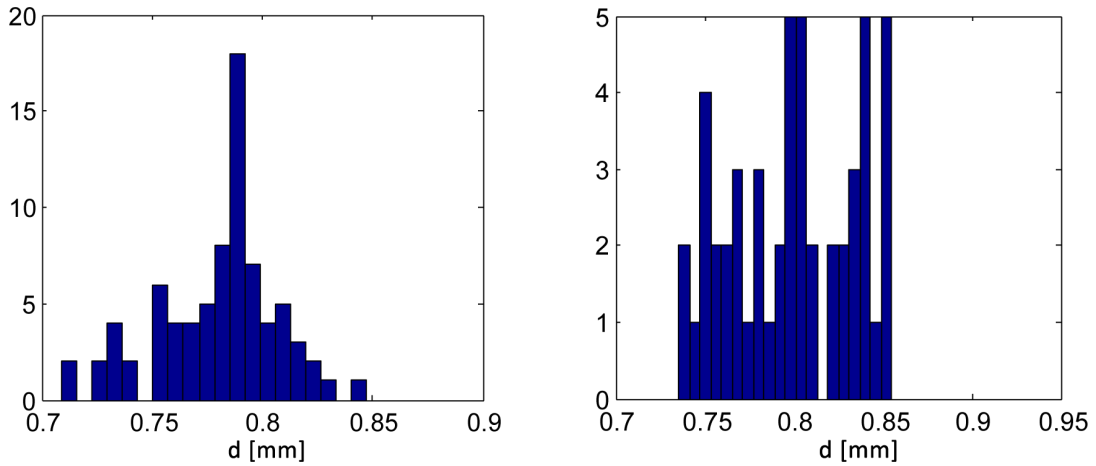


Obrázek 7.3: Vlevo je lebka, ze které se nepodařilo odstranit chybně registrované pseudolandmarky. Vpravo je vidět výsledek rekonstrukce pseudolandmarků. Pro názornost se pracuje pouze s pseudolandmarky umístěnými na vnějším povrchu lebky.

Pseudolandmarky, které nejsou označeny za odlehlé a nejsou následně odstraněny, nejsou poté ani rekonstruovány. Proto většina bodů na pravém obrázku stále zůstává uvnitř lebky a rekonstruováno je pouze malé množství bodů, které jsou viditelné v pravém a levém dolním rohu zranění. Od určitého průměru ϵ -okolí se již chybné body nevyskytují a naopak začíná ubývat správných dat. Pro připomenutí – průměr ϵ -okolí závisí na sadě zvolených landmarků, a to díky standardizaci velikostí lebek na centroidovou velikost během zobecněné prokrústovské analýzy. Přidávání dalších modelů do sady tedy nevyvolá žádnou potřebu průměr okolí měnit. Přidávání bude mít vliv na parametr MinPts, který se ovšem automaticky přepočítává podle velikosti sady. Po sérii pokusů byl průměr okolí nastaven takto:

$$\epsilon = 0,15 \quad (7.1)$$

Parametr MinPts zůstal zachován. Při tomto nastavení je procento chybějících dat $\beta = 16,19\%$, což by mělo vést k dobrému výsledku rekonstrukce. Efekt nastavení uvedených parametrů je ukázán na následujících histogramech a obrázcích. V případě histogramů 7.4 jde o shluky, které obsahovaly odlehlé hodnoty, viz. obr. 7.2. Je vidět, že odlehlé hodnoty byly úspěšně odstraněny.



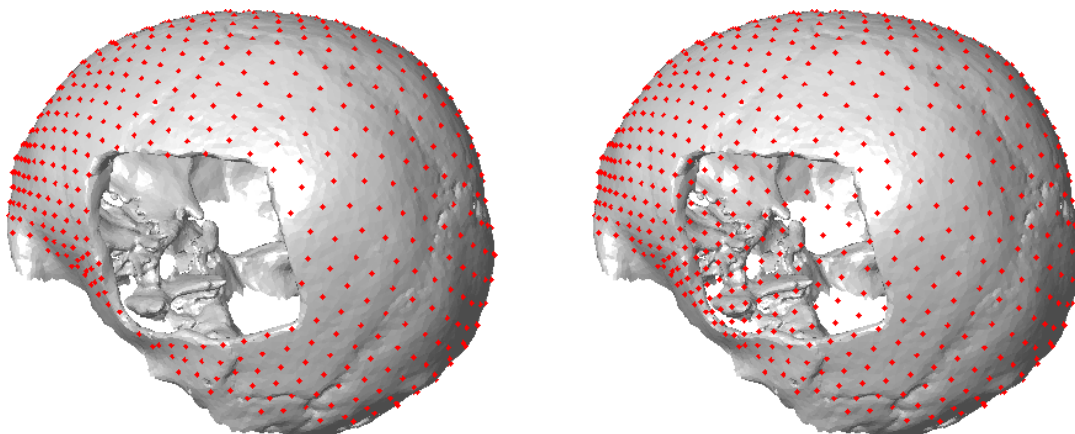
Obrázek 7.4: Vlevo jsou vzdálenosti pseudolandmarku 40, vpravo vzdálenosti pseudolandmarku 300 po odstranění odlehlých hodnot.

Obrázky 7.5 ukazují výsledek identifikace odlehlých hodnot a následnou rekonstrukci polohy pseudolandmarků na stejných lebkách, které jsou na obrázku 7.3. Pro názornost bylo opět pracováno pouze s body ležícími na povrchu lebky. Uvnitř lebky se již nenachází žádné chybně registrované body a výsledek rekonstrukce dostává realistickou podobu.

Odhad polohy chybějících pseudolandmarků

Dále bude pozornost zaměřena na odhad chybějících dat pomocí PPCA. Metoda PPCA vyžaduje jeden parametr, a to počet hlavních komponent, které se mají v datech vyhledat. Počet komponent může být volen v rozmezí od 1 do n , kde n značí celkový počet modelů v rekonstruované sadě, včetně zrcadlených modelů.

PPCA je iterativní proces. Pomocí hlavních komponent a získané transformační matice se modelují všechna data, ne pouze ta chybějící, odhadovaná. Během každé iterace je možné popsat kvalitu statistického modelu pomocí střední kvadratické odchylky RMSE. Odchylka



Obrázek 7.5: Vlevo je lebka, ze které byly správně odstraněny odlehlé pseudolandmarky. Vpravo je vidět výsledek rekonstrukce odstraněných pseudolandmarků.

říká, jak moc se liší data původní a data modelovaná. Tabulka 7.1 zachycuje RMSE během jednotlivých iterací a s použitím různého počtu hlavních komponent. Počet iterací algoritmu byl pro názornost zvolen na 16, avšak ani při nastavení vyššího počtu kroků se již odchylka nijak zajímavě neměnila.

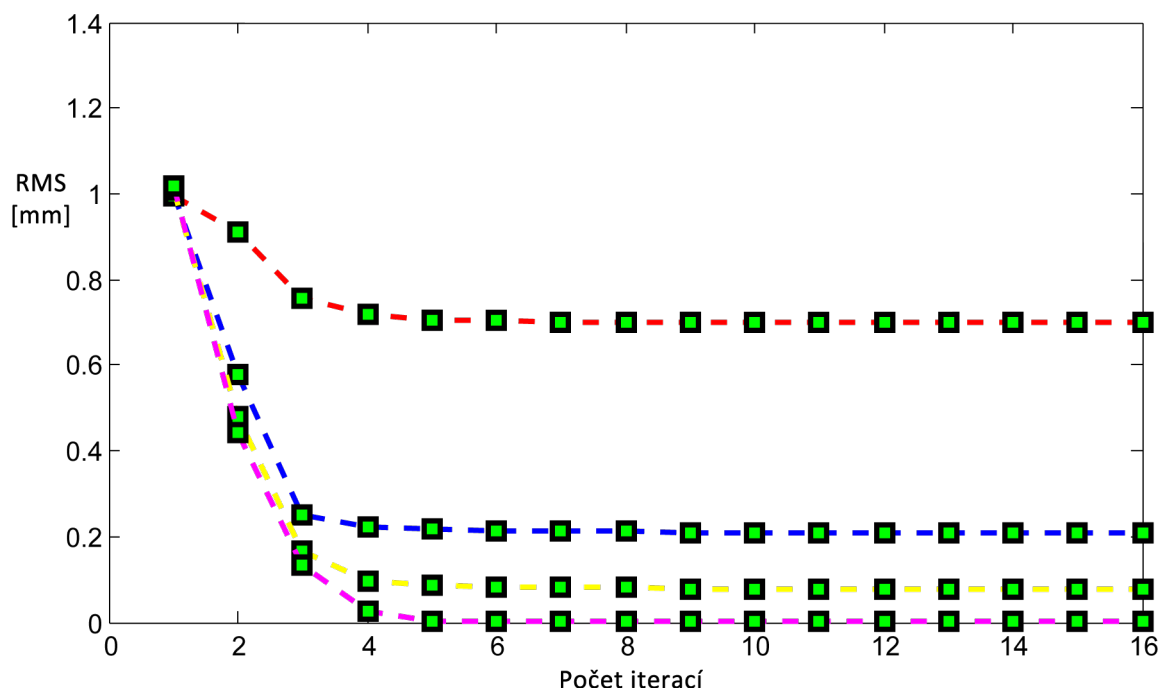
Na obrázcích 7.7 jsou vidět rozdíly v rekonstrukci pro jednotlivé počty komponent. Na prvním obrázku je viditelné, že při použití pouze dvou hlavních komponent leží většina pseudolandmarků mimo povrch lebky, leží buď nad lebku (v přední horní části), nebo jsou naopak ponořené do lebky. Na druhém obrázku, při použití 30 hlavních komponent je situace o poznání lepší, avšak pořád lze pozorovat určité množství bodů zanořených dovnitř kosti. Navíc se objevují dva body, které leží zcela mimo lebku, a to ve výrazné vzdálenosti. Na třetím obrázku již zanořené body nejsou, ale pořád lze pozorovat jeden osamocený, velmi vzdálený bod. Na posledním obrázku, při použití maximálního možného počtu komponent, již nejsou vidět žádné chybně umístěné pseudolandmarky.

Z obrázků 7.7 a RMSE uvedených v tabulce 7.1 je patrné, že nejlepší výsledky dává rekonstrukce v případech, kdy je počet komponent volen na maximální hodnotu, což prakticky znamená, že počet hlavních komponent by měl odpovídat počtu modelů v rekonstruované sadě. Čím nižší je počet komponent, tím je výsledek rekonstrukce horší. Na druhou stranu, čím vyšší je počet komponent, tím je výpočet časově náročnější.

Rekonstrukce povrchu pouze s využitím pseudolandmarků

Jak bylo uvedeno v části 5.7, povrch zranění je možné rekonstruovat s použitím pouze odhadnutých pseudolandmarků. Zmiňovaný postup je vhodný pro místa na lebce, kde není její povrch příliš členitý, například na laterálních částech lebky. Naopak se nehodí pro místa, která obsahují více detailů, například v oblasti očí. Důvodem je fakt, že složitější místa lebky není možné kvalitně podchytit a modelovat pouze pomocí pseudolandmarků. Pro tento účel nepokrývají pseudolandmarky lebku dostatečně hustě a to i přes svůj relativně vysoký počet.

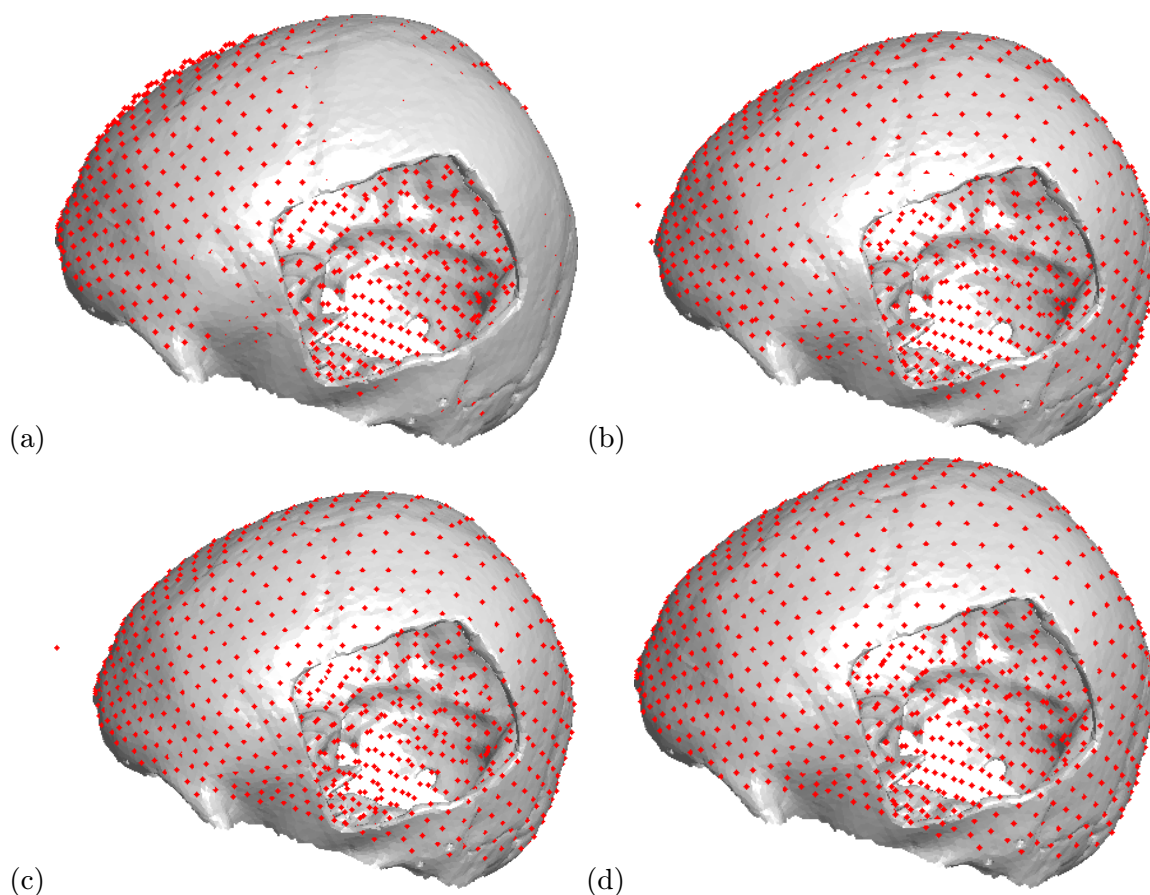
Na obrázku 7.8 je srovnání dvou případů, kde je a kde není tento postup vhodné zvolit. V levé části obrázku je rekonstrukce frontálního zranění, které zasahovalo až do oblasti očí. Na rekonstruovaném tvaru lze pozorovat, že ve své dolní části rekonstrukce selhala.



Obrázek 7.6: Graf konvergence PPCA při použití různého počtu komponent. Červená linka odpovídá použití 2, modrá 30, žlutá 59 a fialová 86 hlavních komponent. Odpovídající hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Číslo iterace	RMSE při 2 komponen- tách [mm]	RMSE při 30 komponen- tách	RMSE při 59 komponen- tách	RMSE při 86 komponen- tách [mm]
1	0,993553	1,001520	1,010030	1,017315
2	0,909477	0,576553	0,480811	0,444629
3	0,754377	0,251547	0,166939	0,133364
4	0,716885	0,222550	0,094598	0,024289
5	0,705873	0,216421	0,086807	0,004305
6	0,702680	0,213703	0,083497	0,000090
7	0,701731	0,212217	0,081421	0,000004
8	0,701443	0,211307	0,079974	0,000000
9	0,701355	0,210700	0,078885	0,000000
10	0,701327	0,210264	0,078018	0,000000
11	0,701319	0,209936	0,077303	0,000000
12	0,701316	0,209680	0,076700	0,000000
13	0,701315	0,209474	0,076184	0,000000
14	0,701315	0,209306	0,075740	0,000000
15	0,701315	0,209166	0,075349	0,000000
16	0,701315	0,209048	0,075002	0,000000

Tabulka 7.1: Střední kvadratická odchylka hodnot modelovaných pomocí PPCA.



Obrázek 7.7: Výsledky rekonstrukce při použití různého počtu hlavních komponent, (a) 2 hlavní komponenty, (b) 30 hlavních komponent, (c) 59 hlavních komponent, (d) 86 hlavních komponent.

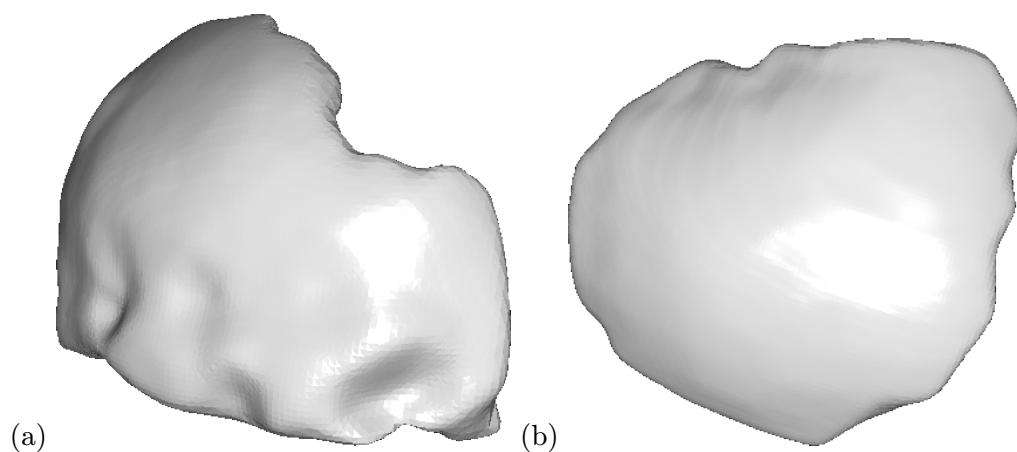
Naopak na obrázku vpravo je vidět odhad povrchu v boční části lebky, kde výsledek rekonstrukce vypadá velmi věrně a neobsahuje artefakty.

Pokud to podmínky umožňují, je vhodné tento postup upřednostnit s ohledem na úsporu času, jelikož registrace referenční lebky na ostatní lebky v sadě je časově náročná operace.

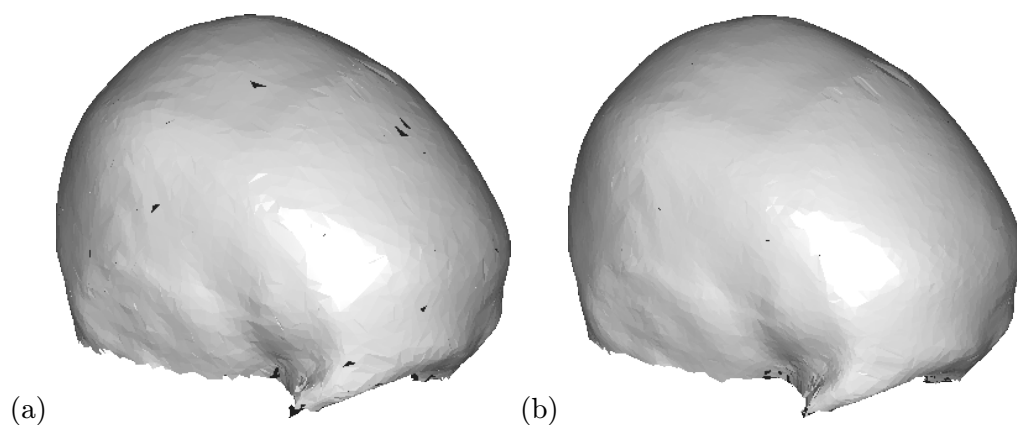
Registrace lebek

Registraci referenční lebky na zbývající modely v sadě ovlivňuje zejména vzorkování cílových lebek a počet pseudolandmarků použitých pro TPS deformaci. Výsledek registrace s využitím a bez využití vzorkování je porovnán na obrázku 7.9. Lebky vypadají tvarově téměř shodně. Chybou je však výrazně vyšší počet backfacing polygonů v případě nepoužití vzorkování. Pokud byla cílová lebka před rekonstrukcí navzorkována, je počet chybných, odvrácených polygonů viditelně nižší. Dalším následkem je, že shluky, které jsou tvořeny správně registrovanými body, budou mít větší rozptyl.

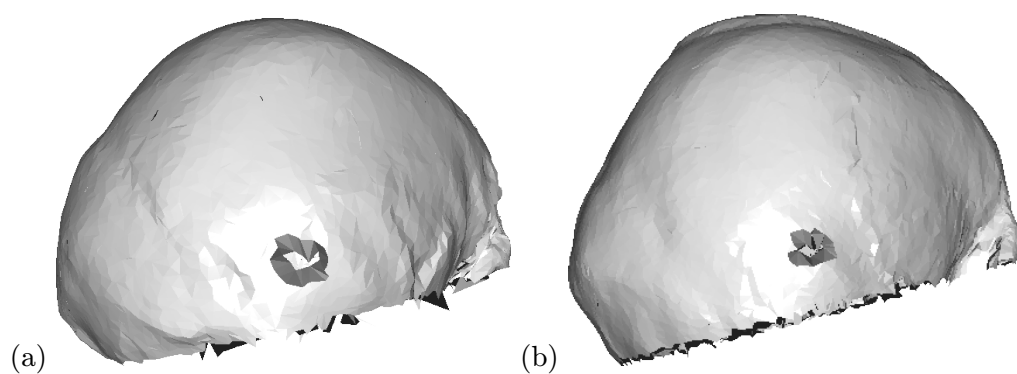
Nízký počet pseudolandmarků může ovlivnit registraci tak, že vnější povrch referenční lebky se bude nesprávně registrovat k vnitřnímu povrchu cílové lebky a *vice versa*. Na registrované lebce budou vznikat oblasti s nulovou tloušťkou kosti. Tyto artefakty jsou zobrazeny na obrázcích 7.10. Každý z povrchů lebek na obrázku byl pokryt počtem 879 pseudoland-



Obrázek 7.8: Rekonstrukce povrchu založená na vzorkování povrchu registrované hemisféry. (a) Rekonstrukce frontálního poranění zasahujícího do očí, (b) rekonstrukce tvaru laterální části lebky.



Obrázek 7.9: Srovnání výsledku registrace bez použití vzorkování (a) a s využitím vzorkování (b).



Obrázek 7.10: (a, b) Artefakty vzniklé registrací vnějšího povrchu k vnitřní straně lebky.

marků. Přesto se na některých lebkách projevuje ilustrovaný artefakt. Čím nižší je počet pseudolandmarků, tím více podobných chyb se na lebkách projevuje a zároveň se zvětšuje jejich povrch. Body, které jsou tímto způsobem chybně registrované, nelze odstranit pomocí výše uvedených metod, jako je DBSCAN apod. Kromě zvyšování počtu pseudolandmarků lze tento problém řešit i způsobem, že se k sobě registrují pouze vrcholy, jejichž normály nesvírají větší úhel než 90 stupňů. Díky tomu se k sobě nebudou registrovat body, které na referenční registrované lebce leží na vnějším, resp. vnitřním povrchu a na cílové lebce leží na vnitřním, resp. vnějším povrchu. Problémem je však časová náročnost takového postupu. Naivní přístup znamená, že ke každé normále vrcholu na referenční lebce se musí vypočítat skalární součin s normálou všech vzorků na cílové lebce. Na základě skalárních součinů se vyberou přípustné body.

Hlavní problém při použití nízkého počtu pseudolandmarků se projeví až při rekonstrukci. Zejména jde o případy, kdy jsou použity pouze jednotky pseudolandmarků, nebo v extrémním případě je krok s TPS deformací zcela vynechán. Pokud bude použitý postup zmíněný v předchozím odstavci, tak se registrovaná lebka nebude na pohled nijak zřetelně lišit od cílové. Problém je však v tom, že korespondence vrcholů mezi jednotlivými lebkami už bude příliš chybová. Obě lebky mohou sice vypadat stejně, ale pokud se následující tvrzení kvůli názornosti poněkud přezene, body z čela referenční lebky mohou například modelovat body na temeni cílové lebky. Výsledkem bude, že rekonstrukce bude dávat velice odlišné tvary oproti očekávání, často až bizarní.

7.2 Odstranění chybně registrovaných bodů

Na obrázku 5.15 je vidět, jak vypadají výsledky registrace lebek v místech zranění, ještě před odstraněním odlehlých hodnot. Většina bodů, které byly na referenční lebce v místech, kde byla cílová lebka nekompletní vlivem zranění, je nyní registrována na hranu tohoto zranění. K identifikaci chybně registrovaných vrcholů polygonální sítě se opět použije metoda DBSCAN, jak tomu bylo i u pseudolandmarků. Tentokrát se ale pracuje přímo se souřadnicemi vrcholů, nikoli se vzdáleností od definovaného středu lebky, proto není možné použít hodnoty parametrů MinPts a ϵ z předchozích experimentů, ale je nutné určit nové. Samotný postup již však bude s předchozím shodný. Nejdříve je vybráno několik různých vrcholů, odpovídající grafy jsou na obrázcích 7.11 a 7.12. Z namátkou vybraných dat je odhadem určen největší možný průměr shluku, jehož hodnota je použita jako počáteční parametr ϵ . Parametr ϵ je nadále snižován tak, dokud metoda neidentifikuje veškeré odlehlé hodnoty. Hodnota parametru MinPts se nejdříve volí na $\frac{n}{2}$, kde n je počet modelů v sadě, následně je experimentálně měněna. Parametr ϵ byl nejdříve nastaven na hodnotu 0.25, po sérii pokusů bylo finální nastavení parametrů stanoveno následovně:

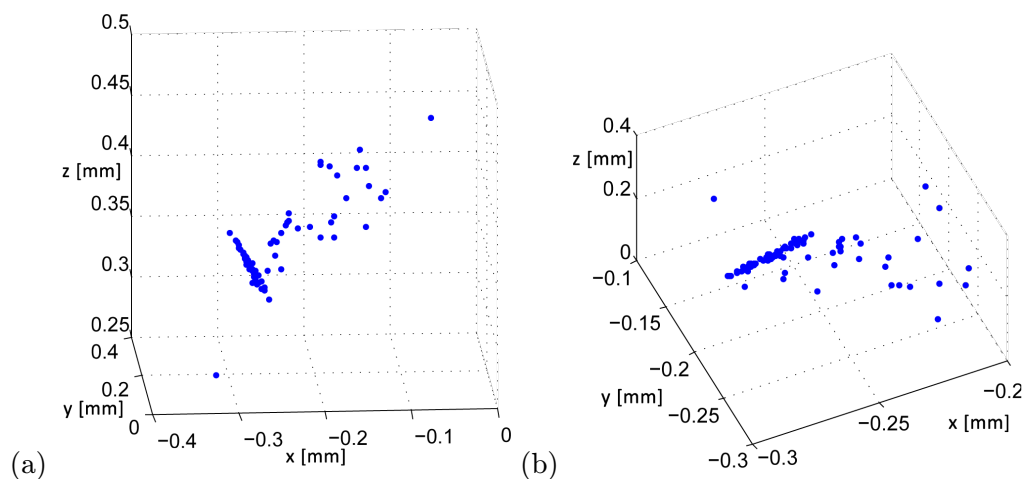
$$\epsilon = 0.015 \quad (7.2)$$

$$\text{MinPts} = \frac{n}{4} \quad (7.3)$$

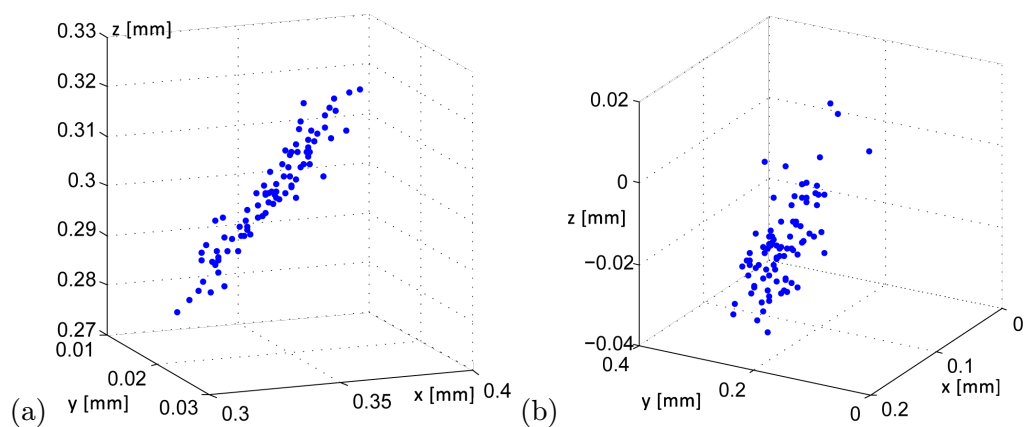
Na obrázku 7.13 jsou vidět shluky z obrázku 7.11 po odstranění odlehlých hodnot s pomocí výše uvedených parametrů.

Při nastavení parametru ϵ na nižší hodnotu již začnou být z modelů odstraňovány i správně registrované body, které se nacházejí ve variabilnějších oblastech lebky. Odstranění chybně registrovaných bodů z lebky je vidět na obrázku 5.17a .

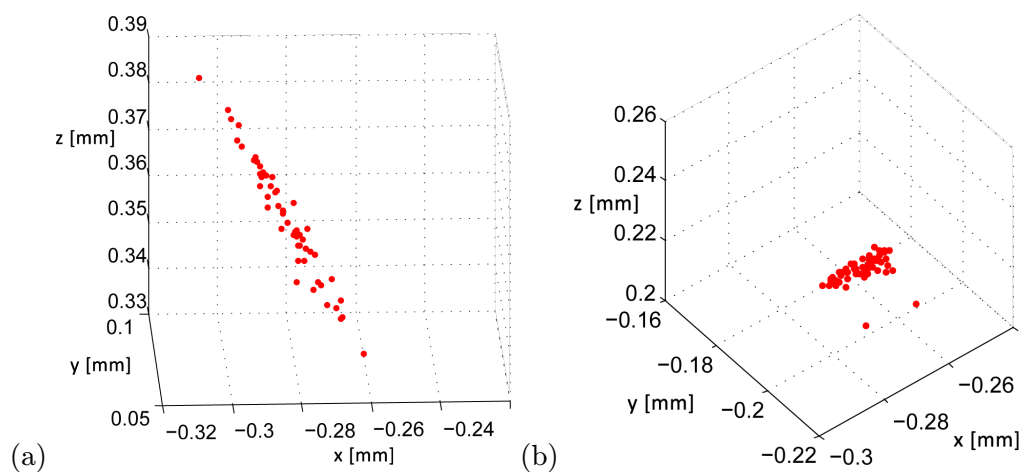
Dalším parametrem, který bylo potřeba odhadnout, je počet iterací vedoucí k odstranění zbývajících bodů chybně přichycených k hranám zranění. Opět je potřeba nalézt kompromis



Obrázek 7.11: Rozptyly vrcholů (a) 1000 a (b) 2000, které obsahují odlehlé hodnoty.



Obrázek 7.12: Rozptyly vrcholů (a) 15000 a (b) 22000, které tvoří shluky bez šumu.

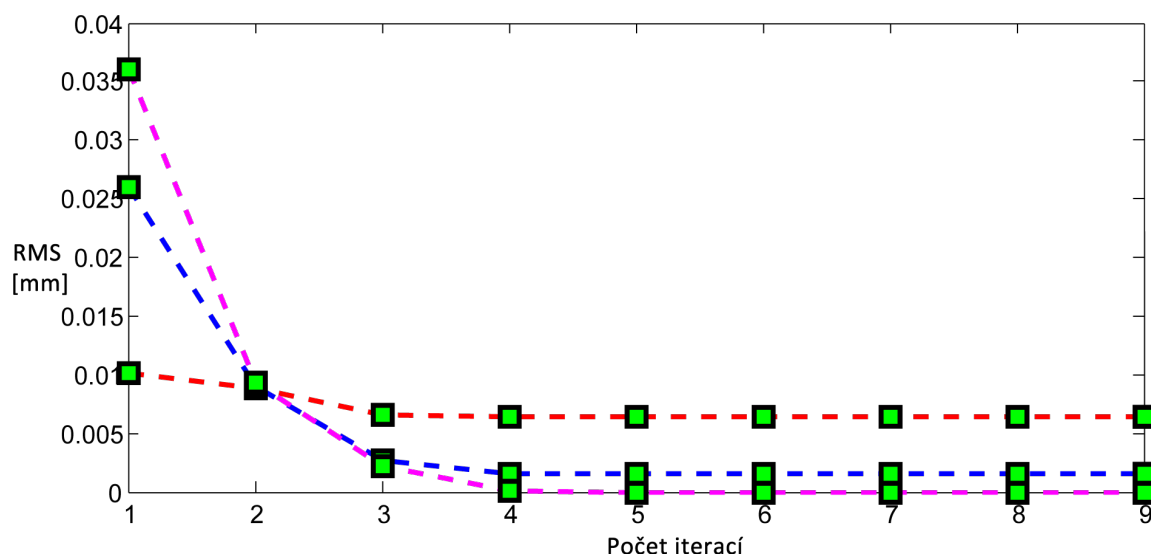


Obrázek 7.13: Pozice vrcholů (a) 1000 a (b) 2000 po odstranění odlehlých hodnot.

mezi počtem odstraněných bodů a počtem chybných bodů, které zůstanou neidentifikovány. Situaci tentokrát ztěžuje fakt, že na různých lebkách může být k hranám registrovaný různý počet bodů, proto nalezená hodnota nebude zcela univerzální pro všechny lebky. Po provedení experimentů byl ideální počet iterací stanoven na 3. Tato hodnota je závislá na nastavení metody DBSCAN. Čím je parametr ϵ vyšší a čím více odlehlých hodnot neidentifikuje, tím je vhodnější volit vyšší počet iterací.

7.3 Rekonstrukce chybějících vrcholů

Stejně jako u rekonstrukce chybějících pseudolandmarků je nutné i u rekonstrukce polygonálních modelů určit počet komponent pro pravděpodobnostní analýzu hlavních komponent. Výsledky rekonstrukce pseudolandmarků naznačují, že nejlepší výsledky by mohlo dávat nastavení parametru na počet modelů v sadě. Bylo provedeno testování pro tři různé počty hlavních komponent a to pro 2 komponenty, 43 komponent a 86 komponent. V grafu 7.14 je znázorněna konvergence podle hodnoty RMSE. Počet iterací byl zvolen na 9. Po tomto počtu iterací se již výsledky nijak výrazně neměnily.



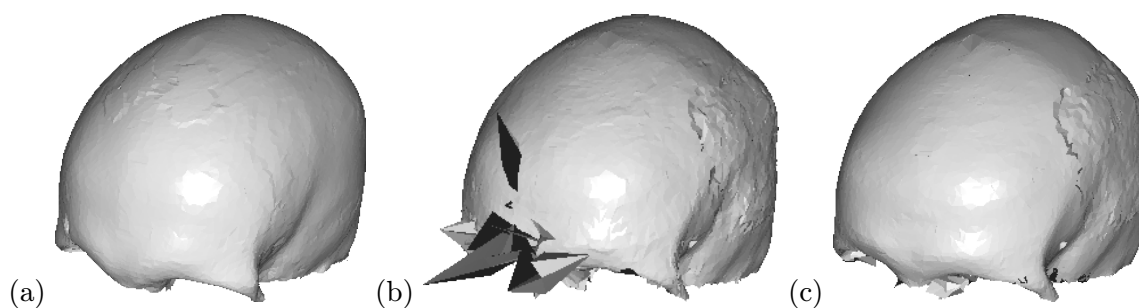
Obrázek 7.14: Graf konvergence metody PPCA pro 2 komponenty (červená linka), 43 komponent (modrá linka) a 86 komponent (fialová linka). Odpovídající hodnoty jsou v tabulce 7.2.

Na obrázku 7.15 je vidět výsledek rekonstrukce pro různé počty hlavních komponent. Při počtu 43 komponent, což je polovina počtu rekonstruovaných modelů, vznikly na lebce artefakty. Artefakty jsou analogické k velmi odlehlým bodům při rekonstrukci pozic pseudolandmarků, viz. obrázek 7.7b a 7.7c. Při porovnání lebek rekonstruovaných pomocí 2 a 86 komponent lze pozorovat, že při použití pouze dvou komponent má lebka hladký povrch a není zřetelný okraj zranění, zatímco při použití 86 komponent je povrch hrubější. Na obrázku 7.16 je vidět srovnání zmíněných lebek z pohledu, jak přesně jdou daným počtem komponent modelovat. Na obou obrázcích je lebka s odstraněnými odlehlými hodnotami a barevně je vyznačeno, jak se od ní rekonstruované lebky liší. Modrá barva značí nulovou odchylku, zelená odchylku kolem 3mm. Opět se dá říci, že jde o analogii k pseudolandmarkům, viz. obr. 7.7a, kdy modelované body neležely na povrchu lebky. Byly buď nad

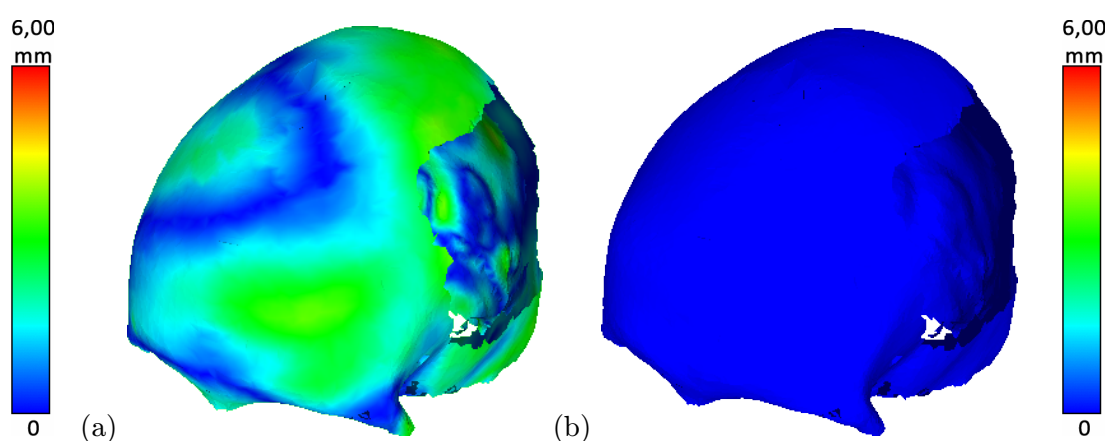
povrchem, nebo se do lebky nořily. Ačkoliv je rekonstruovaný model při použití pouze dvou komponent hladší a není patrná hrana zranění, je nutné nastavovat nejvyšší možný počet komponent, aby bylo modelování co nejpřesnější.

Číslo iterace	RMSE při 2 komponentách [mm]	RMSE při 43 komp. [mm]	RMSE při 86 komp. [mm]
1	0,010162	0,025957	0,036086
2	0,008810	0,008966	0,009254
3	0,006583	0,002603	0,002214
4	0,006451	0,001619	0,000113
5	0,006442	0,001547	0,000000
6	0,006442	0,001509	0,000000
7	0,006441	0,001485	0,000000
8	0,006441	0,001470	0,000000
9	0,006441	0,001460	0,000000

Tabulka 7.2: RMSE během jednotlivých iterací metody PPCA.



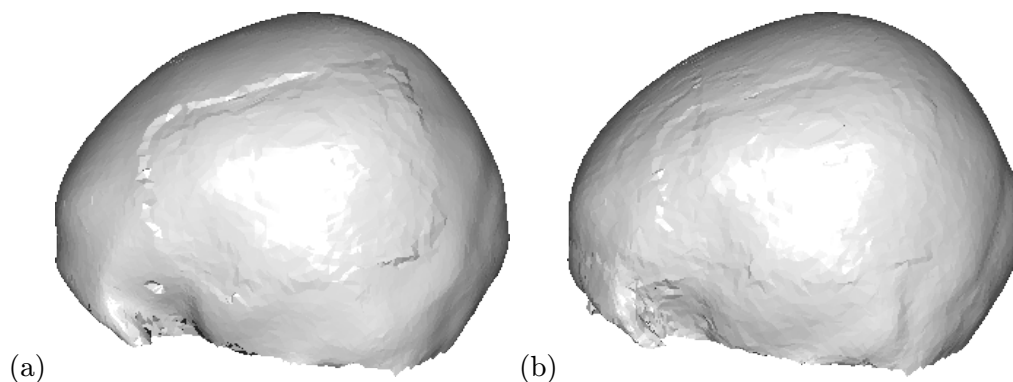
Obrázek 7.15: Výsledky rekonstrukce klenby lebky s použitím (a) 2 komponent, (b) 43 komponent, (c) 86 komponent.



Obrázek 7.16: Přesnost modelování pomocí (a) 2 hlavních komponent (b) 86 hlavních komponent. Barevná škála ukazuje rozmezí 0 – 6 mm.

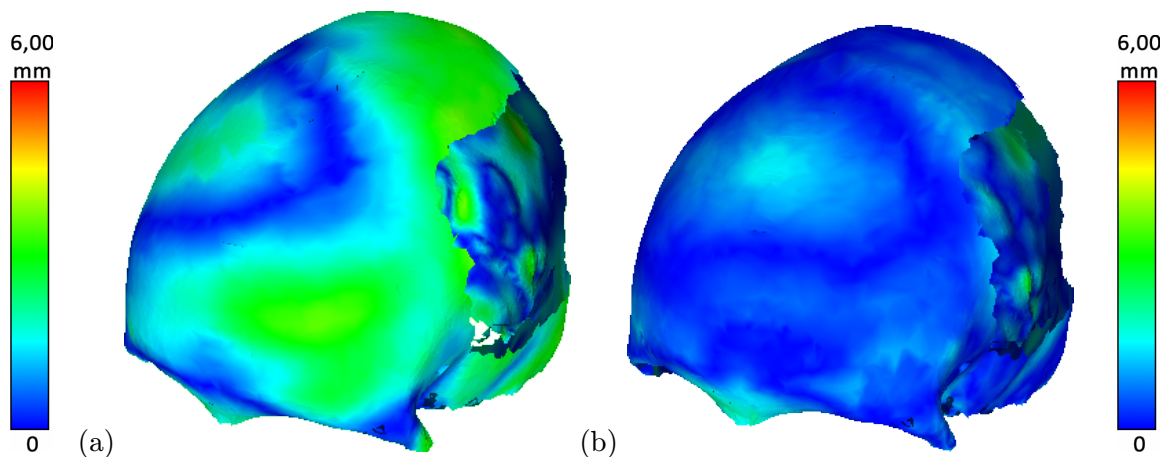
7.4 Vyhlazení hrany zranění

Na výsledku rekonstrukce, viz. obr. 7.15, je vidět hrana v místě, kde odhadnutá část navazuje na zbytek lebky. Bylo ukázáno, že při nižším počtu komponent vznikají na lebce artefakty a při velmi nízkém počtu komponent už nelze lebku příliš dobře modelovat. Lze však vynulovat určitý počet komponent, které modelují nejméně variability. Na obrázku 7.17 je porovnávána situace, kdy byla lebka rekonstruována plným počtem komponent (a) a kdy byly zachovány hodnoty pouze prvních 25 komponent (b). Hodnoty zbývajících komponent byly vynulovány.



Obrázek 7.17: (a) Původní rekonstrukce lebky, (b) rekonstrukce při zachování prvních 25 hlavních komponent.

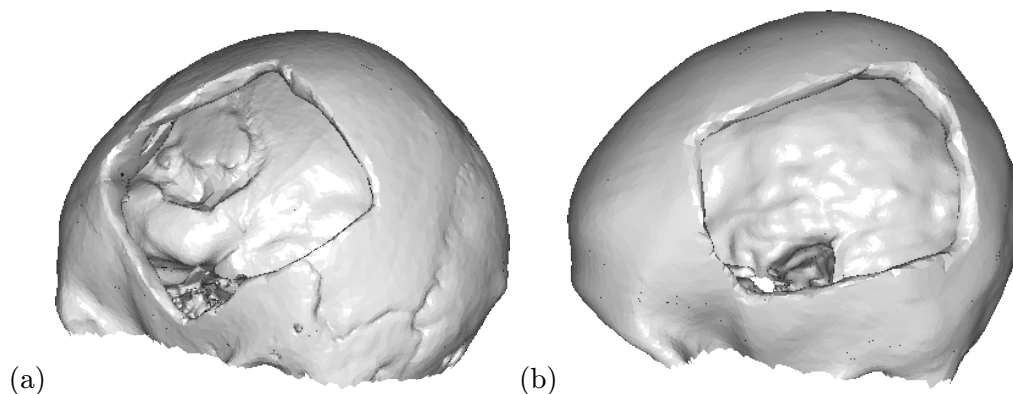
Na obrázcích je vidět, že hrana zranění je stále ještě rozeznatelná, avšak už je mnohem méně výrazná. Vyhlazen byl povrch v pravém horním i spodním rohu. Výška hrany se významně snížila v levém horním rohu a podél horní linie. Na obrázku 7.18 je srovnání přesnosti modelování při použití velmi nízkého počtu komponent a při nulování komponent. Ve druhém případě je přesnost výrazně vyšší a zároveň nevznikají žádné artefakty.



Obrázek 7.18: Přesnost modelování pomocí (a) 2 hlavních komponent (b) 86 komponent při vynulování posledních 61 komponent. Barevná škála se pohybuje v rozmezí 0 – 6,00 mm.

7.5 Věrohodnost rekonstrukce

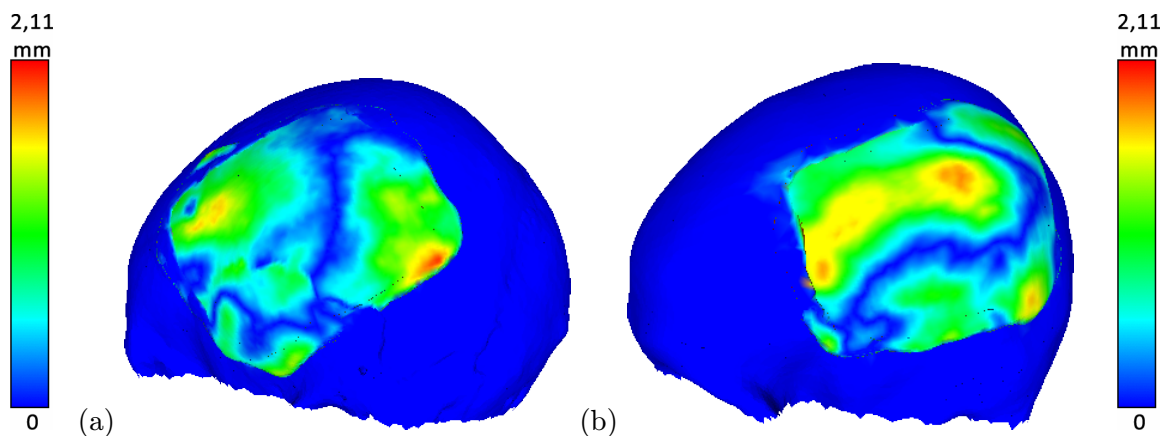
Důležitou otázkou je, do jaké míry je odhad chybějící části lebky věrohodný, jak odpovídá původnímu tvaru. Věrohodnost byla ověřována postupem uvedeným v části 5.11. Pro připomenutí – v kompletních lebkách byla uměle vytvořena zranění, následně byla rekonstruována a výsledek byl pomocí Hausdorffovy vzdálenosti porovnán s původní lebkou. Na obrázku 7.19 jsou dvě lebky, na kterých byla virtuálně způsobena traumata.



Obrázek 7.19: Původně kompletní lebky s uměle vytvořeným zraněním.

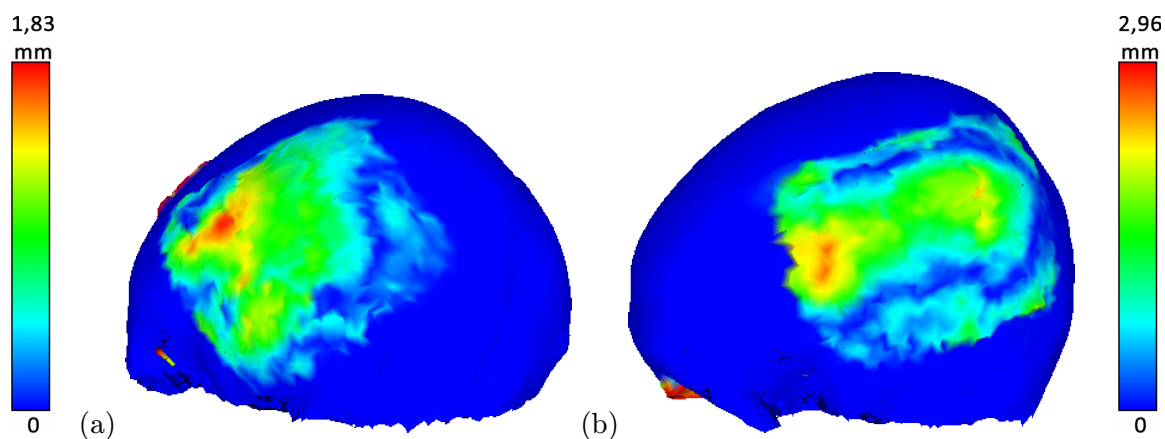
Následující tři obrázky ukazují věrohodnost při využití různých postupů při rekonstrukci. U každého obrázku je uveden rozsah odchylky pomocí barevné škály. Rozsahy se mezi jednotlivými lebkami mírně liší. Modrá barva vždy značí nulovou odchylku, červená barva maximální odchylku.

Na obrázku 7.20 je výsledek pro rekonstrukci pouze pomocí pseudolandmarků, vzorkování sféry a Poissonovy rekonstrukce povrchu, viz. část 5.7.



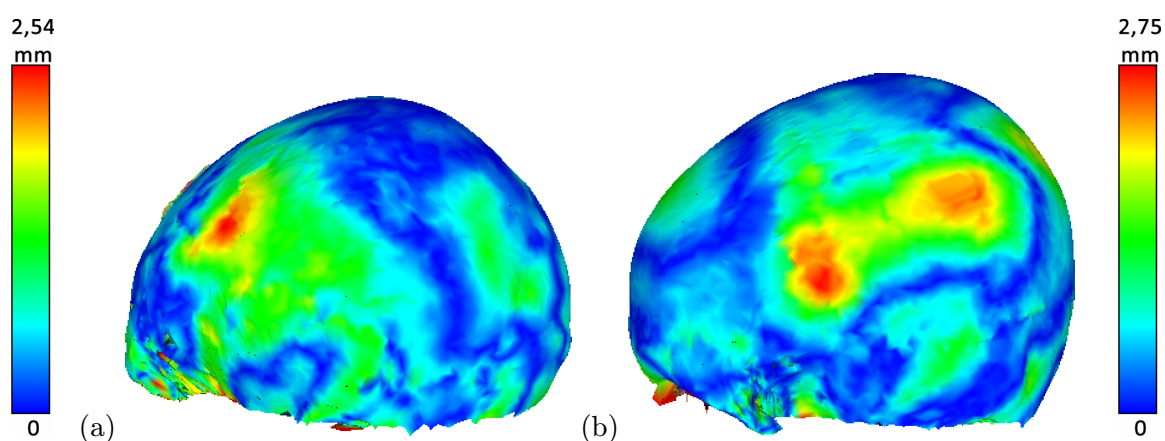
Obrázek 7.20: Rekonstrukce pouze s pomocí pseudolandmarků. Rozsah barevné škály je v případě (a) i (b) shodný: 0 – 2,11 mm.

Obrázek 7.21 ukazuje věrohodnost rekonstrukce pro postup s registrací referenční lebky a s využitím všech komponent. Žádné komponenty nejsou nulovány, hrana zranění není nijak upravována.



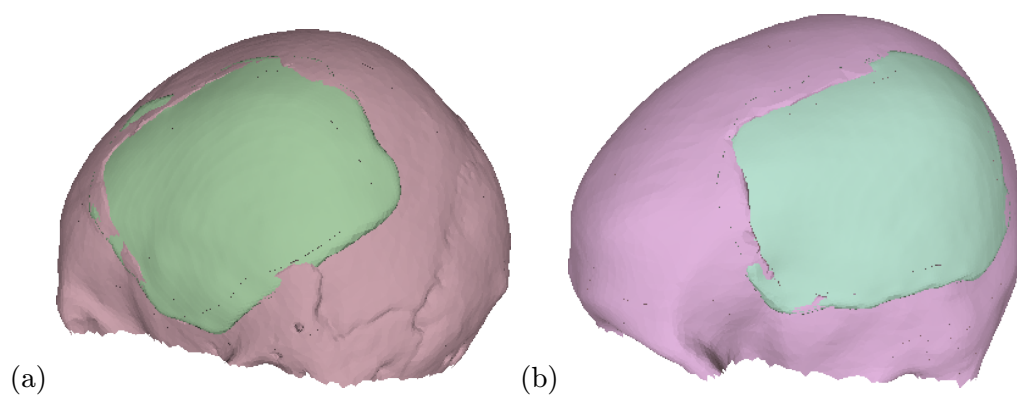
Obrázek 7.21: Rekonstrukce pomocí referenční lebky. Rozsah barevné škály je (a) 0 – 1,83 mm (b) 0 – 2,96 mm.

Obrázek 7.22 ilustruje věrohodnost rekonstrukce při použití prvních 25 hlavních komponent, hodnoty zbývajících 61 komponent byly vynulovány.

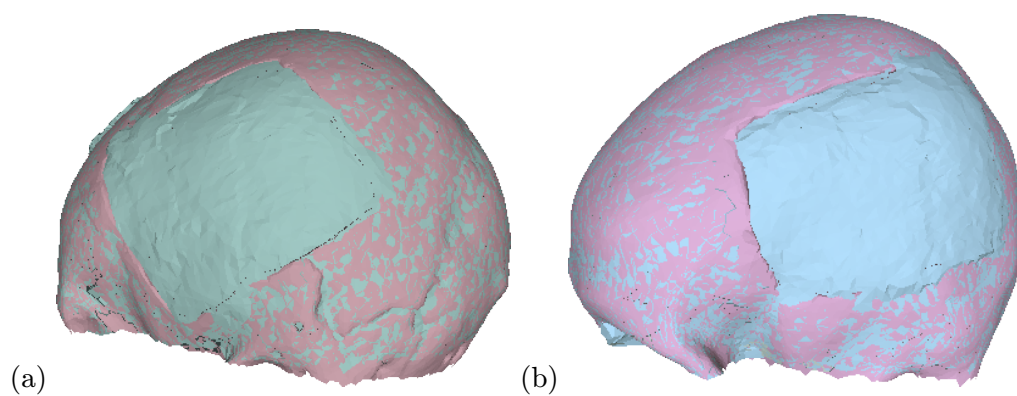


Obrázek 7.22: Rekonstrukce s nulováním komponent. Rozsahy chyby jsou (a) 0 – 2,54 mm (b) 0 – 2,75 mm.

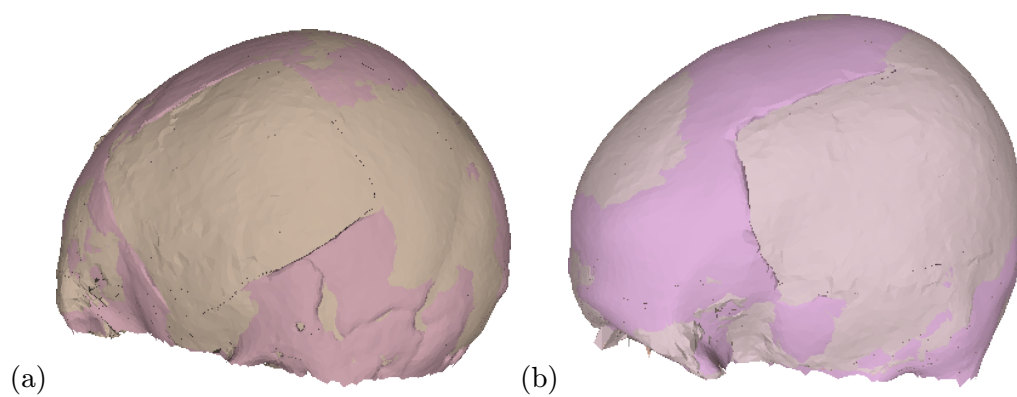
Následující 3 obrázky ukazují proložení zraněné lebky s rekonstruovanou lebkou – opět pro různé postupy při rekonstrukci. Ilustrují zejména návaznost obou lebek v oblasti zranění. Na obrázku 7.25 je vidět, že vyhlazení hrany zanedbáním určitého počtu komponent nevedlo k lepším výsledkům z pohledu věrohodnosti. Na rekonstruované lebce hrana téměř zmizela, ale návaznost na původní lebku zůstala téměř beze změny.



Obrázek 7.23: Návaznost části rekonstruované pouze pomocí pseudolandmarků na zraněnou lebku.



Obrázek 7.24: Návaznost lebky rekonstruované s využitím všech komponent na zraněnou lebku.



Obrázek 7.25: Návaznost v případě vyhlazení hrany vynulováním posledních 65 hlavních komponent.

7.6 Shrnutí výsledků

Experimenty byly prováděny na datové sadě obsahující 43 modelů. Po zrcadlení sada obsahovala celkem 86 modelů a to včetně referenční lebky. Na každou lebku bylo projektováno celkem 1758 pseudolandmarků, z toho 879 bodů na vnitřní povrch kosti a stejný počet na vnější povrch kosti.

Pro odhalení chybně projektovaných pseudolandmarků byly experimentálním způsobem zjištěny parametry pro metodu DBSCAN. Hodnoty těchto parametrů jsou $\text{MinPts} = \frac{n}{2}$, kde n je počet modelů v sadě, konkrétně tedy 86, a průměr ϵ -okolí je 0,15. Při tomto nastavení je odstraněno celkem 16,19% pseudolandmarků. Údaj zahrnuje i body, které nebyly projektovány vůbec kvůli chybějící části lebky.

Ukázalo se, že pro rekonstrukci chybějících pseudolandmarků pomocí metody PPCA je ideální volit takový počet hlavních komponent, jaký je počet modelů v sadě, včetně zrcadlených modelů. Nejlepší výsledky dává nastavení na 86 komponent, a to jak z pohledu směrodatné odchylky RMSE, tak z pohledu velmi odlehlých hodnot, které vznikají při nastavení menšího počtu komponent. Při použití pouze dvou komponent modelované pseudolandmarky leží mimo lebku, metoda není schopna přesně modelovat jejich pozice. Bylo ukázáno, že rekonstrukce pouze s pomocí pseudolandmarků a hemisféry vede k akceptovatelným výsledkům v částech lebky, které neobsahují příliš detailů. Prakticky jde o laterální části lebky. Pro rekonstrukci zranění, které zasahuje například do očí, nedává tento postup použitelné výsledky.

Následně byl ukázán efekt vzorkování cílové lebky, na kterou se registruje referenční lebka. Při vzorkování vede registrace ke kvalitnějším výsledkům. Mohou však vznikat artefakty, kdy se vnější povrch kosti registruje chybně k povrchu vnitřnímu. Čím méně pseudolandmarků je použito, tím méně přesná je TPS deformace referenční lebky a počet takových artefaktů může narůstat. Zároveň se může zvětšovat velikost artefaktů. Tyto artefakty nelze odstranit pomocí metody DBSCAN. Metoda DBSCAN se zaměřuje na body, které byly chybně registrovány na hranu zranění. Zkoumány byly ideální parametry pro její nastavení. Po řadě experimentů byly stanoveny na $\text{MinPts} = \frac{n}{4}$ a průměr ϵ okolí na hodnotu 0,015, n opět značí počet modelů v sadě.

Bylo ukázáno, že počet hlavních komponent pro metodu PPCA má v případě rekonstrukce odstraněných bodů analogický vliv na výsledek jako v případě rekonstrukce pseudolandmarků. Při minimálním počtu není schopno PPCA polygonální modely věrně modelovat, při vyšším počtu vznikají artefakty. Ideální počet komponent je stejně jako v případě pseudolandmarků 86. Při rekonstrukci na lebkách často vznikají hrany v místě, kde na sebe navazují původní a odstraněné body. Tuto hranu lze významně zredukovat vynulováním určitého počtu posledních komponent, v ilustrovaných případech bylo vynulováno posledních 61 z 86 hlavních komponent. Odstraněním hrany se však nezlepší věrohodnost lebky. Při proložení vyhlazené lebky s původní zraněnou lebku zůstává návaznost prakticky nezměněná.

Poslední část kapitoly se zabývala testováním věrohodnosti rekonstrukce. Ze všech testovaných případů nebyla odchylka původní lebky od rekonstruované lebky větší než 3 mm.

Kapitola 8

Závěr

Práce se zaměřovala na oblast modelování kraniálních implantátů. Cílem práce bylo vytvořit metodu, která by umožňovala provést odhad tvaru chybějících částí lebky. Motivací pro rekonstrukci tvaru poškozené lebky byla snaha poskytnout modelářům co nejpřesnější předlohu pro další modelování implantátu.

Rekonstrukce byla řešena pomocí statistického modelu tvaru. Metoda předpokládá, že modeláři mají k dispozici celou sadu poraněných lebek od různých pacientů a že tyto lebky jsou většinou poškozené v laterálních částech. Hlavní myšlenkou bylo ze souboru traumatizovaných lebek sestavit statistický model, který bude generovat kompletní a nezraněné lebky. Tato myšlenka byla převzata z dizertační práce T. Albrechta, který se zabýval statistickými modely kostí. Převzata byla pouze idea, že pokud poranění na lebkách budou způsobovat jenom lokální chyby během registrace referenční lebky, bude možné tato místa odstranit a rekonstruovat pomocí metody PPCA.

Práce řeší zejména způsob předzpracování dat pomocí anotace antropometrickými body, registraci referenční lebky na poraněné lebky a identifikaci chybně registrovaných bodů. Registrace byla řešena pomocí projekce pseudolandmarků, TPS warpingu pomocí pseudolandmarků, vzorkováním cílové lebky a vyhledáním nejbližších bodů vůči referenční lebce. Byl navržen způsob, jak identifikovat chyby registrace pomocí metody DBSCAN, specificky k zadaným datům a jak zajistit vyváženost rozložení zranění pomocí zrcadlení modelů.

Důležitou částí bylo experimentování s účelem zjistit ideální nastavení parametrů jednotlivých metod, zejména metod DBSCAN a PPCA. Pro metodu PPCA bylo zjištěno, že nejlepších výsledků se dosahuje při nastavení maximálního počtu hlavních komponent. Testována byla věrohodnost odhadu vytvořením umělého zranění, jeho rekonstrukcí a porovnáním s původním tvarem lebky. Ke srovnání lebek byla využita Hausdorffova vzdálenost. Výsledek ukázal, že nejvíce se lebky lišily o 2,96 milimetru. Otevřenou otázkou zůstává, jak nejlépe vyřešit návaznost rekonstruované lebky na poškozenou lebku v místě zranění. Hranu zranění lze odstranit, ale za cenu snížení věrohodnosti rekonstrukce.

Práce nabízí řadu možností na rozšíření. Jedná se zejména o nalezení způsobu, jak zlepšit návaznost odhadnutého povrchu v místě zranění na původní lebku. Mezi další vhodná rozšíření lze zařadit vytvoření více statistických modelů, lišících se pohlavím a zařazením do věkových kategorií, s cílem zvýšení věrohodnosti rekonstrukce. Lze předpokládat, že lebku daného věku a pohlaví bude nejlépe rekonstruovat statistický model vytvořený ze skupiny jedinců stejného pohlaví a přibližně stejného věku. Posledním námětem je vymyslet způsob, jak v jeden okamžik rekonstruovat pouze jednu lebku místo celé sady.

Literatura

- [1] Abdi, H.; Williams, L. J.: Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, ročník 2, č. 4, 2010: s. 433–459, ISSN 1939-0068, doi:10.1002/wics.101.
URL <http://dx.doi.org/10.1002/wics.101>
- [2] Albrecht, T.: *3D Statistical Shape Models of Human Bones*. Basel, 2011. Dizertační práce. Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Basel.
URL <http://edoc.unibas.ch/1324/1/thesis-albrecht-pdf.pdf>
- [3] Aspert, N.; Santa-Cruz, D.; Ebrahimi, T.: MESH: Measuring Errors between Surfaces using the Hausdorff Distance. *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, ročník 1, 2002.
URL <http://mesh.berlios.de/mesh.pdf>
- [4] Bookstein, F.: Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*, ročník 1, č. 3, 1997.
URL <http://www.femininebeauty.info/i/bookstein.sliding.pdf>
- [5] Bookstein, F. L.: Principal warp: Thin-plate Splines and the Decomposition of Deformations. *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, ročník 12, č. 6, 1989.
URL <http://www.engineering.uiowa.edu/~aip/papers/bookstein-89.pdf>
- [6] Borovanský, L.; Čihák, R.: *Soustavná anatomie člověka: Učebnice pro lék. fakulty. Díl 2*. Avicenum, 1976.
URL <http://books.google.cz/books?id=q9xXSgAACAAJ>
- [7] Brechbühler, C.; Gerig, G.; Kübler, O.: Parametrization of closed surfaces for 3-D shape description. *Computer Vision and Image Understanding*, ročník 61, č. 2, 1995: s. 154–170.
URL http://www.bioen.utah.edu/wiki/images/2/2e/1995_Brechbuhler.pdf
- [8] Cootes, T.; Taylor, C. J.: Combining point distribution models with shape models based on finite element analysis. *Image and Vision Computing*, 1995: s. 419–428.
- [9] Cootes, T. F.; Taylor, C. J.; Cooper, D. H.; aj.: Active Shape Models-Their Training and Application. *COMPUTER VISION AND IMAGE UNDERSTANDING*, ročník 61, č. 1, 1995.
URL <http://www.wiau.man.ac.uk/~bim/Papers/cviu95.pdf>
- [10] Davies, R. H.; Cootes, T. F.; Taylor, C. J.: A Minimum Description Length Approach to Statistical Shape Modelling. In *IPMI '01 Proceedings of the 17th International*

Conference on Information Processing in Medical Imaging, Springer-Verlag London, UK, 2001, s. 50–63.

- [11] Dedner, A.; Lüthi, M.; Albrecht, T.; aj.: Curvature Guided Level Set Registration Using Adaptive Finite Elements. In *Pattern Recognition*, Springer Berlin Heidelberg, 1997, s. 527–536.
URL http://gravis.cs.unibas.ch/publications/2007/DAGM07_Dedner.pdf
- [12] DROZDOVÁ, E.: Základy osteometrie. v MALINA, J. a kol.: Panoráma biologické a sociokulturní antropologie : Modulové učební texty pro studenty antropologie a "příbuzných" oborů. Brno, 2004.
- [13] Dryden, I. L.; Mardia, K. V.: *Statistical shape analysis*. Wiley series in probability and statistics, Chichester, New York: John Wiley & Sons, 1998, ISBN 0-471-95816-6.
URL <http://opac.inria.fr/record=b1098310>
- [14] Ester, M.; Kriegel, H.; S, J.; aj.: A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. AAAI Press, 1996, s. 226–231.
- [15] Filzmoser, P.; Maronna, R.; Werner, M.: Outlier identification in high dimensions. *Computational Statistics & Data Analysis*, ročník 52, č. 3, 2008: s. 1694 – 1711, ISSN 0167-9473, doi:10.1016/j.csda.2007.05.018.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167947307002204>
- [16] Friedman, J. H.; Bentley, J. L.; Finkel, R. A.: An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time. *ACM Trans. Math. Softw.*, ročník 3, č. 3, Září 1977: s. 209–226, ISSN 0098-3500, doi:10.1145/355744.355745.
URL <http://doi.acm.org/10.1145/355744.355745>
- [17] Gunz, P.; Mitteroecker, P.; Neubauer, S.; aj.: Principles for the virtual reconstruction of hominin crania. *Journal of Human Evolution*, ročník 57, č. 1, 2009: s. 48 – 62, ISSN 0047-2484, doi:10.1016/j.jhevol.2009.04.004.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004724840900058X>
- [18] Hinneburg, A.; Hinneburg, E.; Keim, D. A.: An Efficient Approach to Clustering in Large Multimedia Databases with Noise. AAAI Press, 1998, s. 58–65.
- [19] Ilin, A.; Raiko, T.: Practical Approaches to Principal Component Analysis in the Presence of Missing Values. *J. Mach. Learn. Res.*, ročník 11, Srpen 2010: s. 1957–2000, ISSN 1532-4435.
URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1756006.1859917>
- [20] Lüthi, M.; Albrecht, T.; Vetter, T.: *Building Shape Models from Lousy Data*. MICCAI 2009, London.
URL http://gravis.cs.unibas.ch/publications/2009/MICCAI09_outlier_detection.pdf
- [21] SKADŁUBOWICZ, P.; KRÓL, Z.; WRÓBEL, Z.; aj.: USING OF STATISTICAL SHAPE MODELS FOR PELVIS RECONSTRUCTION IN THE ONCOLOGIC SURGERY. *JOURNAL OF MEDICAL INFORMATICS & TECHNOLOGIES*, ročník 2009, č. 13, 2009.
URL http://jmit.us.edu.pl/ftp/journal/2009/13/25%20-%20MM%20-%2003%20-%20MIT-2009-Skadlubowicz-Krol_popr2.pdf

- [22] Stegmann, M. B.; Gomez, D. D.: *A brief introduction to statistical shape analysis*. University of Denmark, DTU. 2002.
- [23] Zachow, S.; Lamecker, H.; Elsholtz, B.; aj.: Reconstruction of mandibular dysplasia using a statistical 3D shape model. *International Congress Series*, ročník 2005, č. 1281, 2005: s. 1238 – 1243.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S053151310500600X>
- [24] Zelditch, L.: *Geometric Morphometrics For Biologists: A Primer*. Elsevier Academic Press, 2004, ISBN 9780127784601.
URL <http://books.google.cz/books?id=LKCVAGn8vkoC>
- [25] Amira. FEI COMPANY. *VSG* [online]. 2013 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.vsg3d.com/amira/overview>
- [26] Barycentric coordinate system. *Wikipedia - the free encyklopedia* [online]. 2004 [cit. 2013-05-07].
URL http://en.wikipedia.org/wiki/Barycentric_coordinate_system
- [27] Block 4, Anatomy Lab 2. Quizlet [online]. 2013 [cit. 2013-05-07].
URL <http://quizlet.com/14469446/block-4-anatomy-lab-2-flash-cards/>
- [28] Comparing Neanderthals and modern humans. Computer-Assisted Paleoanthropology [online]. 2008 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.aim.uzh.ch/morpho/wiki//CAP/N2>
- [29] DBSCAN. *Wikipedia, the free encyklopedia* [online]. 2007 [cit. 2013-05-07].
URL <http://en.wikipedia.org/wiki/DBSCAN>
- [30] DICOM sample image sets. *OsiriX Imaging Software* [online]. 2003 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.osirix-viewer.com/datasets/>
- [31] Evolutionary Morphing. *IDAV* [online]. 2002 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.idav.ucdavis.edu/research/EvoMorph>
- [32] GOM. *GOM Inspect* [online]. 2013 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>
- [33] Human Female European Skull with Calvarium Cut BC-150. *Pacific Distributing Books and Bones* [online]. 2009 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.booksandbones.com/content/human-female-european-skull-calvarium-cut-bc-150>
- [34] MACLEOD, N. Landmarks and Semilandmarks: Differences without Meaning and Meaning without Difference. The Palaeontological Association (PalAss): Palaeo Maths 101 [online]. 2013 [cit. 2013-05-13].
URL http://www.palass.org/modules.php?name=palaeo_math&page=35
- [35] MATLAB - The Language of Technical Computing. *MathWorks* [online]. 1994 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

- [36] MATLAB Central. *MathWorks* [online]. 1994 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.mathworks.com/matlabcentral/>
- [37] Measuring the difference between two meshes. *MeshLab Stuff* [online]. 2010 [cit. 2013-05-07].
URL <http://meshlabstuff.blogspot.cz/2010/01/measuring-difference-between-two-meshes.html>
- [38] MeshLab. *SourceForge - Download, Develop and Publish Free Open Source Software* [online]. 2012 [cit. 2013-05-07].
URL <http://meshlab.sourceforge.net/>
- [39] Orientace na lidském těle. *Wikipedie* [online]. 2009 [cit. 2013-05-07].
URL http://cs.wikipedia.org/wiki/Orientace_na_lidsk%C3%A9m_t%C4%9Ble
- [40] Pohmoždění mozku. *Wikipedie* [online]. 2009 [cit. 2013-05-07].
URL http://cs.wikipedia.org/wiki/Pohmo%C5%BEd%C4%9Bn%C3%AD_mozku
- [41] Schädel. *Roche Lexikon Medizin* [online]. 2000 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.tk.de/rochelexikon/pics/s34256.000-1.html>
- [42] Visible Human Project. *The National Library of Medicine* [online]. 2003 [cit. 2013-05-07].
URL <http://www.nlm.nih.gov/research/visible/>

Příloha A

Obsah CD

Příložené CD obsahuje následující položky:

- dokument **Rekonstrukce tvaru polygonálních modelů.pdf** obsahující tuto technickou zprávu v elektronické podobě,
- plakát **poster.pdf** ilustrující postupy a výsledky dosažené v této práci,
- složku **Zdrojové kódy** obsahující podsložky
 - **Aplikace** se zdrojovými kódy pro Matlab,
 - **Technická zpráva** s obrázky a zdrojovými kódy pro L^AT_EX.